

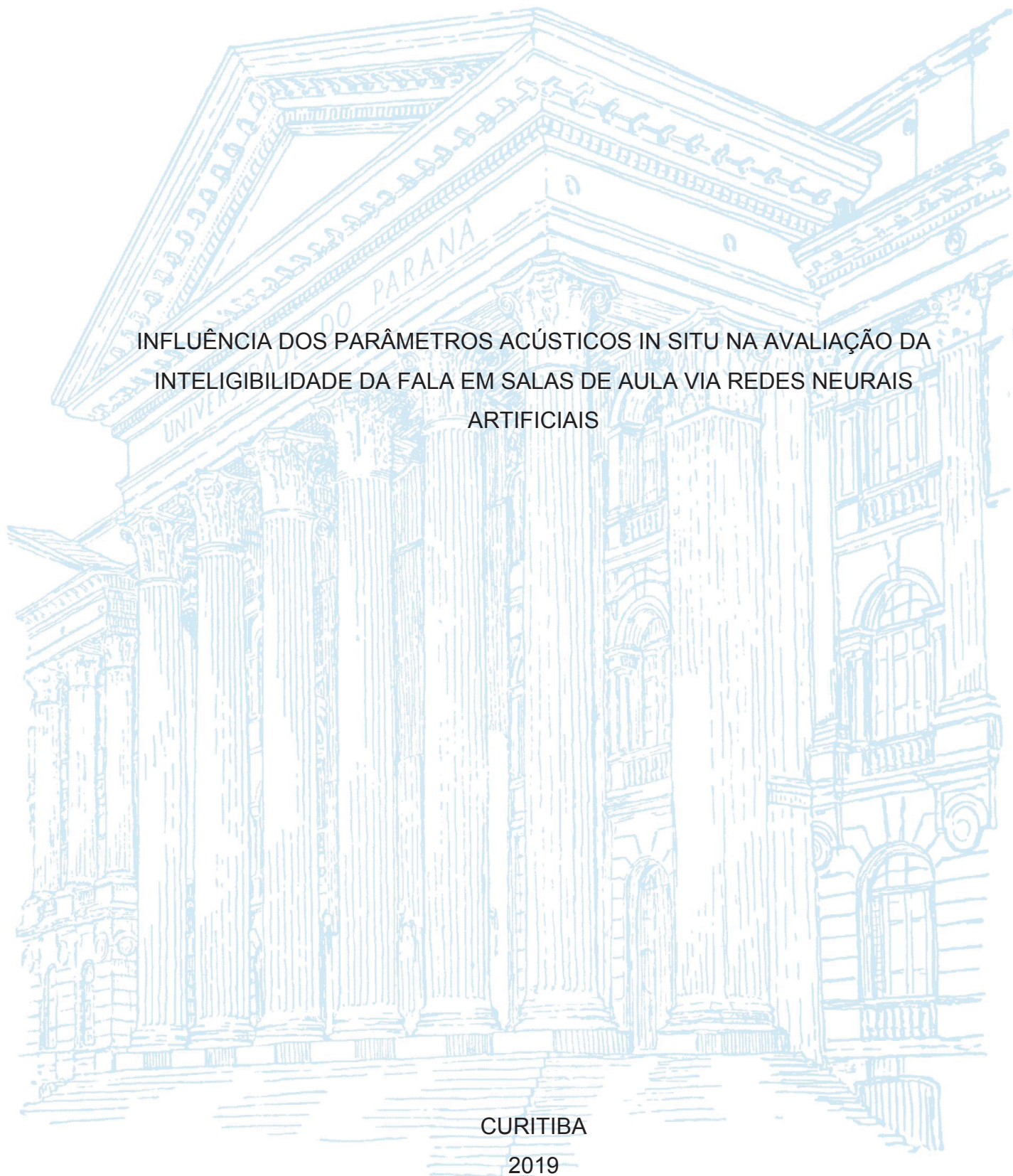
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ERIBERTO OLIVEIRA DO NASCIMENTO

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS ACÚSTICOS IN SITU NA AVALIAÇÃO DA
INTELIGIBILIDADE DA FALA EM SALAS DE AULA VIA REDES NEURAIS
ARTIFICIAIS

CURITIBA

2019



ERIBERTO OLIVEIRA DO NASCIMENTO

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS ACÚSTICOS IN SITU NA AVALIAÇÃO DA
INTELIGIBILIDADE DA FALA EM SALAS DE AULA VIA REDES NEURAIS
ARTIFICIAIS

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de concentração de Fenômenos de Transporte e Mecânica dos Sólidos.

Orientador: Prof. Titular Dr. -Ing. Paulo Henrique Trombetta Zannin

CURITIBA

2019

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

N244i Nascimento, Eriberto Oliveira do
Influência dos parâmetros acústicos *in situ* na avaliação da
inteligibilidade da fala em salas de aula via redes neurais
artificiais [recurso eletrônico] / Eriberto Oliveira do Nascimento
– Curitiba, 2019.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de
Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia
Mecânica.

Orientador: Paulo Henrique Trombetta Zannin

1. Acústica – salas de aula. 2. Redes Neurais Artificiais. 3.
Transmissão da Fala. I. Universidade Federal do Paraná. II.
Zannin, Paulo Henrique Trombetta. III. Título.

CDD: 620.25



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA
MECÂNICA - 40001016040P5

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA MECÂNICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **ERIBERTO OLIVEIRA DO NASCIMENTO** intitulada: **INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS ACÚSTICOS IN SITU NA AVALIAÇÃO DA INTELIGIBILIDADE DA FALA EM SALAS DE AULA VIA REDES NEURAIS ARTIFICIAIS**, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua Aprovação no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 14 de Fevereiro de 2019.

PAULO HENRIQUE TROMBETTA ZANNIN

Presidente da Banca Examinadora (UFPR)

ARCANJO LENZI

Avaliador Externo (UFSO)

PAULO JUSTINIANO RIBEIRO JÚNIOR

Avaliador Externo (UFPR)

EDUARDO MARCIO DE OLIVEIRA LOPES

Avaliador Interno (UFPR)

Dedico este trabalho as mulheres mais importantes de minha vida, a primeira, minha querida mãe, Rita Aparecida, e a segunda, minha amada noiva, Rayssa Gomes. Sem o apoio de vocês este trabalho dificilmente seria concluído, ou mesmo teria saído do papel.

Dedico ainda, a todas as pessoas que me ajudaram durante esta jornada. A gratidão que tenho sempre levarei comigo.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Tit. Dr. -Ing. Paulo H. T. Zannin, pelos valiosos ensinamentos e orientação. Por acreditar na proposta de trabalho e sempre incentivar um alto nível de comprometimento com as pesquisas. Agradeço também por abdicar de sábados com família para realizar as medições acústicas.

Agradeço aos membros da banca avaliadora pelas sugestões e comentários visando a contínua melhora do trabalho. Em especial ao Prof. Eduardo Lopes pela rigorosa correção no trabalho, e pelas valiosas sugestões quanto a pertinência dos efeitos não lineares, dado no contexto do trabalho.

Não posso deixar de agradecer uma pessoa que, sem sombra de dúvida, devo toda a execução deste trabalho, meu grande amigo Felipe Luz de Oliveira, por todo o apoio desde o início. Agradeço também à família do Felipe, que me recebeu muito bem. Agradeço ao Prof. Dr. Lucas Nonato pela intermediação e a minha recomendação para o Prof. Zannin.

Agradeço ao colega Júlio Herrmann, por toda a ajuda durante as medições e por ter passado sua experiência sobre o STI. Também agradeço aos colegas Gabriel Pértile, Rafael Ferraz e o Giovanne Lima.

Aos colegas de laboratório Thomas Jeferson, Daniel Souza, Matheus Mazur e Gabrielle Schittini pela boa companhia. Em especial agradeço a ajuda das alunas de iniciação científica Carla Dechechi e Lígia Medina pela ajuda nas medições e nas modelagens das salas no software ODEON. Estendo ainda meus agradecimentos especiais para a amiga de laboratório Caroline Amorim, pelas boas conversas e pela ajuda constante nas medições e pelo bom humor durante a convivência.

Ao ex-secretário do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - PGMEC, Sr. Marcio Brandani Tenório, por toda a ajuda e as orientações dadas durante o início do mestrado. Estendo meus agradecimentos para o atual secretário do programa, Jonatas Ricardo Zanoto, por todo o auxílio, em especial a ajuda com os problemas técnicos referentes ao sistema acadêmico.

A CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela bolsa de estudos via o PGMEC.

A Universidade Federal do Paraná (UFPR) pela ótima estrutura, e ao Prof. Zannin, pela ótima estrutura do Laboratório de Acústica Ambiental, Industrial e

Conforto Acústico – LAAICA, que possui umas das melhores estruturas em termos de pessoal e instrumentação para pesquisar e estudar acústica no Brasil.

“A good many times I have been present at gatherings of people who, by the standards of the traditional culture, are thought highly educated and who have with considerable gusto been expressing their incredulity of scientists. Once or twice I have been provoked and have asked the company how many of them could describe the Second Law of Thermodynamics. The response was cold: it was also negative. Yet I was asking something which is the scientific equivalent of: Have you read a work of Shakespeare's? I now believe that if I had asked an even simpler question -- such as, What do you mean by mass, or acceleration, which is the scientific equivalent of saying, Can you read? -- not more than one in ten of the highly educated would have felt that I was speaking the same language. So the great edifice of modern physics goes up, and the majority of the cleverest people in the western world have about as much insight into it as their neolithic ancestors would have had.”

— C.P. Snow

SNOW, Charles Percy. **The Two Cultures and the Scientific Revolution.** (Repr.). Cambridge [Eng.]: University Press, 1959.

RESUMO

O excesso de ruído em salas de aula configura-se como uma das principais causas de problemas vocais em professores. Além disso, a presença do ruído interfere negativamente sobre a relação ensino-aprendizagem, provocando a perda de informação transmitida do professor aos alunos. Com isto, condições acústicas adequadas fazem-se pertinentes nas salas de aula. Portanto, este trabalho teve como objetivo avaliar a qualidade acústica em 5 salas de aula da Universidade Federal do Paraná (UFPR) no campus Centro Politécnico, aplicando as normas ISO 9921, ISO 3382, NBR 12179, NBR 10152 e IEC 602068-16. Com isto, determinaram-se as possíveis correlações e redundâncias entre os descritores: Tempo de Reverberação - T30, Tempo Central - Ts, Tempo de Decaimento Inicial - EDT, Definição - D50, Claridade - C50, Razão de Som Útil-a-Prejudicial - U50 e Índice de Transmissão da Fala - STI, e as significâncias dos seguintes fatores sobre aqueles: ruído de fundo - (A), coeficiente de absorção sonora - (B), confinamento - (C) e ocupação - (D). Para tanto, a metodologia consistiu em aplicar o Planejamento Fatorial de Experimentos do tipo 2⁴ não replicado, realizado com base nas simulações validadas no software ODEON versão 11, para criar as matrizes de respostas, totalizando 80 salas virtuais e 53 respostas. De posse das matrizes de respostas, criou-se uma matriz de correlação entre os descritores e, posteriormente, aplicou-se a Análise de Componentes Principais e gerou-se a redução dimensional dos dados, nos quais se aplicou a Regressão Linear Múltipla para determinar parcimoniosamente os efeitos de significância sob o viés linear. Numa heurística não linear, a significância foi determinada pelas Redes Neurais Artificiais (RNAs), por meio de 6 topologias da arquitetura Perceptron Multicamadas, treinadas 50 vezes de forma independente, nas quais implementou-se o Método Profile Modificado. Os resultados evidenciaram que somente uma sala de aula da UFPR cumpria os requisitos mínimos de qualidade acústica. As análises de correlação agruparam os descritores em 3 grupos: 1º grupo: (EDT, T30 e Ts), 2º grupo (C50 e D50) e 3º grupo (U50 e STI). Demonstrou-se que, quanto maior o TR, menor o STI. Altas correlações entre o U50 e STI foram verificadas, resultados estes concordantes com a literatura. A análise de significância mostrou que a absorção, fator (B), interfere mais nos descritores de reverberação (1º e 2º grupos) e o ruído de fundo, fator (A), interfere fortemente sobre o STI e U50. O fator C pouco interfere nos descritores acústicos. Os efeitos de interação de 3ª e 4ª ordens não possuem significância relevante sobre as salas estudadas. Conclui-se que os resultados obtidos estão de acordo com a literatura corrente e que com a metodologia desenvolvida neste trabalho pode ser aplicada em outras salas, objetivando realizar análises dos descritores acústicos.

Palavras-chave: Índice de Transmissão da Fala. Redes Neurais Artificiais. Acústica de Salas. Planejamento Fatorial de Experimentos. Tempo de Reverberação.

ABSTRACT

Excessive noise in classrooms is one of the main causes of vocal problems in teachers. In addition, the presence of noise interferes negatively on the teaching-learning relationship, causing the loss of information transmitted from the teacher to the students. With this, adequate acoustic conditions become relevant in classrooms. The aim of this study was to evaluate acoustic quality in 5 classrooms of the Federal University of Paraná (UFPR) at the Polytechnic Campus, applying the standards ISO 9921, ISO 3382, NBR 12179, NBR 10152, and IEC 602068-16. Thus, it was determined the possible correlations and redundancies between the following descriptors: Reverberation Time - T30, Central Time - Ts, Early Time Decay - EDT, Definition - D50, Clarity - C50, Useful-to-detrimental sound ratio - U50 and Speech Transmission Index - STI, and the significance of the following factors on those: background noise - (A), sound absorption coefficient - (B), confinement - (C) and occupation - (D). The methodology consisted of applying the Design of Experiments of type 2⁴ not replicated, based on the validated simulations in the ODEON version 11 software, to create the response matrices, totaling 80 virtual rooms and 53 responses. A matrix of correlation between the descriptors was created and then the Principal Components Analysis was applied. A dimensional reduction of the data was generated in which the Multiple Linear Regression was applied to parsimoniously determine the effects of significance in a linear manner. In a non-linear heuristic, the significance was determined using Artificial Neural Networks (ANNs), through 6 topologies of a Multilayer Perceptron architecture, trained 50 times independently, in which the Modified Profile Method was implemented. The results showed that only one classroom met the minimum acoustic quality requirements. The correlation analyzes grouped the descriptors into 3 groups: 1st group: (EDT, T30, and Ts), 2nd group (C50 and D50) and 3rd group (U50 and STI). It was shown that the higher the RT the lower the STI. High correlations between U50 and STI were verified, and these results agreed with the literature. The analysis of significance showed that absorption, factor (B), interferes more on reverberation descriptors (1st and 2nd groups), while background noise, factor (A), strongly interferes with STI and U50. The factor C is inexpressive in the acoustic descriptors. The interaction effects of 3rd and 4th orders did not have any significant significance on the studied rooms. It is concluded that the results obtained agree with the current literature and that the methodology developed in this work can be applied in other rooms aiming to analyze acoustic descriptors.

Keywords: Speech Transmission Index. Artificial Neural Networks. Design of Experiments. Room Acoustics. Reverberation Time.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – ESPECTROGRAMA DAS REFLEXÕES DE ONDA EM AMBIENTE REVERBERANTE.....	29
FIGURA 2 – EXEMPLO DAS CURVAS DE RUÍDO - NC	34
FIGURA 3 – TEMPO DE REVERBERAÇÃO EM FUNÇÃO DA FINALIDADE DE USO	35
FIGURA 4 – ENVELOPE DE FALA E FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DE MODULAÇÃO	41
FIGURA 5 – INFOGRÁFICO SOBRE O FATOR DE REDUÇÃO DE MODULAÇÃO	42
FIGURA 6 – CORRELAÇÕES ENTRE STI E MEDIDAS SUBJETIVAS DE INTELIGIBILIDADE.....	55
FIGURA 7 – RELAÇÃO ENTRE A INTELIGIBILIDADE SUBJETIVA VERSUS OBJETIVA.....	55
FIGURA 8 – EFEITO DA RELAÇÃO SINAL RUÍDO SOBRE O STI	59
FIGURA 9 – EFEITO COMBINADO ENTRE RSR E T60 SOBRE O STI	60
FIGURA 10 – RELAÇÃO DO STI EM FUNÇÃO DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO	61
FIGURA 11 – RELAÇÃO ENTRE STI E U50	64
FIGURA 12 – METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DE CORRELAÇÃO E SIGNIFICÂNCIA.....	66
FIGURA 13 – MONTAGEM DO APARATO EXPERIMENTAL.....	68
FIGURA 14 – CONFIGURAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO PARA A MEDIÇÃO DE STI	69
FIGURA 15 – CONFIGURAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO PARA A MEDIÇÃO DE T30.....	71
FIGURA 16 – VARIAÇÃO DOS DESCRITORES PARA A ESCALA NO ODEON versão 11.	73
FIGURA 17 – MODELO DE UMA REDE PERCEPTRON MULTICAMADAS	84
FIGURA 18 – ESQUEMA DE ATRIBUIÇÃO DA RELAÇÃO ENTRADA/SAÍDA NO TREINO DA REDE.....	85
FIGURA 19 – ESQUEMA DE ATRIBUIÇÃO DA RELAÇÃO ENTRADA/SAÍDA NO TREINO DA REDE.....	87

FIGURA 20 – ESQUEMA DO MÉTODO <i>PROFILE</i> ORIGINAL.....	90
FIGURA 21 – LOCALIZAÇÃO DAS SALAS DE AULA MEDIDAS	92
FIGURA 22 – ÁREA DE ABSORÇÃO DISTRIBUÍDA NOS MATERIAIS NO AUD. 1 ENG. QUI.....	97
FIGURA 23 – CURVA DE CALIBRAÇÃO PARA AS SALAS	98
FIGURA 24 – EXEMPLO DA ATENUAÇÃO ESPACIAL DO Leq [dB]	100
FIGURA 25 – ATENUAÇÃO ESPACIAL DO STI CALCULADO EM FUNÇÃO DO TIPO DE STI	101
FIGURA 26 – VARIAÇÃO ESPACIAL DO STI NAS SALAS DE AULA.....	102
FIGURA 27 – VARIAÇÃO ESPACIAL DO $U50$ EM 1 kHz NAS SALAS DE AULA	103
FIGURA 28 – VARIAÇÃO ESPACIAL DO EDT NAS SALAS DE AULA	104
FIGURA 29 – VARIAÇÃO ESPACIAL DO $D50$ NAS SALAS DE AULA.....	104
FIGURA 30 – EFEITO DA INTRODUÇÃO DE AUDIÊNCIA NA SALA SOBRE O $U50$ EM 1 kHz.....	105
FIGURA 31 – DISPOSIÇÃO MULTIBANDA DOS DESCRITORES VIA DOE.....	106
FIGURA 32 – <i>BI PLOT</i> DA ACP PARA A SALA AUD. 1 ENG. QUI.	108
FIGURA 33 – CURVAS <i>PROFILE</i> DO MPM PARA O STI COMO RESPOSTA NO AUD. 1 ENG. QUI.	110
FIGURA 34 – DISPOSIÇÃO DOS EFEITOS EM FUNÇÃO DOS FATORES CONTROLÁVEIS	111
FIGURA 35 – DISTRIBUIÇÃO NORMAL DOS EFEITOS DOE-z E MPM-z NO AUD. 1 ENG. QUI.	112
FIGURA 36 – COMPARAÇÃO DOS EFEITOS POR SALA VIA DOE-z e MPM-z .	113
FIGURA 37 – <i>BOX PLOT</i> DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO [s] PARA AS SALAS MEDIDAS.....	118
FIGURA 38 – MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE OS DESCRITORES ACÚSTICOS	121
FIGURA 39 – COMPARAÇÃO DOS EFEITOS POR DESCRITOR VIA DOE-z E MPM-z.....	125

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – COMPONENTES NO CÁLCULO DE ÁREA DE ABSORÇÃO DE UMA SALA.....	31
QUADRO 2 – CLASSIFICAÇÃO DE SALAS VIA COEFICIENTE DE ABSORÇÃO MÉDIO.	32
QUADRO 3 – MODELOS DETERMINÍSTICOS QUE RELACIONAM STI E TR.....	62
QUADRO 4 – MATRIZ CONTRASTE COM A ORDEM DOS EFEITOS NO PLANEJAMENTO 2 ^K	76
QUADRO 5 – COEFICIENTES DE ABSORÇÃO SONORA DAS OCUPAÇÕES NAS SALAS	77
QUADRO 6 – MATRIZ CONTRASTE X (ENTRADA) NA REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA.....	78
QUADRO 7 – CONFIGURAÇÕES DOS PROJETOS DAS REDES NEURAIS.....	88
QUADRO 8 – VALORES DE RUÍDO DE FUNDO [dB] E CURVA NC.	93
QUADRO 9 – VALORES MÉDIOS MEDIDOS DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO - TR [s]	94
QUADRO 10 – VALORES MÉDIOS MEDIDOS DO TEMPO DE DEICAMENTO INICIAL – EDT [s].....	94
QUADRO 11 – VALORES MÉDIOS MEDIDOS DA DEFINIÇÃO – D50.	94
QUADRO 12 – VALORES MÉDIOS MEDIDOS DA CLARIDADE – C50 [dB].....	95
QUADRO 13 – VALORES MÉDIOS MEDIDOS DO TEMPO CENTRAL – Ts [ms]...	95
QUADRO 14 – VALORES MÉDIOS MEDIDOS DO STI	96
QUADRO 15 – VOLUME E ABSORÇÃO MÉDIA DAS SALAS ESTUDADAS	97
QUADRO 16 – ERROS E CORRELAÇÃO NA VALIDAÇÃO DAS SALAS SIMULADAS PARA O T30.....	99
QUADRO 17 – VARIÂNCIA EXPLICADA EM FUNÇÃO DOS COMPONENTES PRINCIPAIS.....	109
QUADRO 18 – INTRACORRELAÇÕES DOS DESCRITORES – AUD. 1 ENG. QUI.	109
QUADRO 19 – COMPARAÇÃO DAS CURVAS DE RUÍDO - NC.....	116
QUADRO 20 – COMPARAÇÃO DO TR [s] FRENTE ÀS NORMAS	117
QUADRO 21 – COMPARAÇÃO DO D50 FRENTE ÀS NORMAS	118
QUADRO 22 – COMPARAÇÃO DO Ts e EDT FRENTE A NORMA ISO 3382-1 ...	119

QUADRO 23 – COMPARAÇÃO QUALITATIVA DO STI QUALITATIVO PARA AS SALAS	120
QUADRO 24 – COMPARAÇÃO DO STI FRENTE ÀS NORMAS	120
QUADRO 25 – INDEXADORES DOS DESCRITORES MOSTRADOS NA FIGURA 38	122
QUADRO 26 – EFEITOS DA CONDIÇÃO ACÚSTICA SOBRE OS DESCRITORES	128

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 –	CORREÇÃO DOS FILTROS DE PONDERAÇÃO EM “A”, “B” E “C”..	28
TABELA 2 –	VALORES RECOMENDADOS PARA RUÍDO DE FUNDO E NC	46
TABELA 3 –	VALORES RECOMENDADOS DE TEMPO DE REVERBERAÇÃO ..	47
TABELA 4 –	VALORES DE REFERÊNCIA DA FALA USANDO D50 e Ts.	47
TABELA 5 –	VALORES QUALITATIVOS NOMINAIS DO STI.	48
TABELA 6 –	RELAÇÕES ENTRE STI, AI, C50 e D50 QUANTO À QUALIDADE DA FALA	63
TABELA 7 –	RELAÇÃO ENTRE A ESCALA DO STI E DO U50	64
TABELA 8 –	NÍVEIS DO PLANEJAMENTO FATORIAL.	75
TABELA 9 –	INDEXADORES (K) DA MATRIZ DE RESPOSTAS	76

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACP	- Análise dos Componentes Principais
ANF 14 Bio.	- Anfiteatro 14 do setor de biológicas
ANF. 02 Bio.	- Anfiteatro 02 do setor biológicas
ANF. 04 Bio.	- Anfiteatro 04 do setor biológicas
ANNs	- <i>Artificial Neural Networks</i>
ANSI	- <i>American National Standard Institute</i>
ASTM	- <i>American Society for Testing and Materials</i>
AUD. 1 Eng. Qui.	- Auditório 1 da Engenharia Química
BGN	- <i>Background Noise</i>
CV	- Consoante-Vogal
CVC	- Consoante-Vogal-Consoante
DFE	- <i>Department for Education</i>
DIN	- <i>Deutsches Institut Für Normung</i>
DOE	- <i>Design of Experiments</i>
DOE-z	- Significância do DOE na escala z
EDT	- <i>Early Decay Time</i> (Tempo de Decaimento Inicial)
EQM	- Erro Quadrático Médio
IEC	- <i>International Electrotechnical Commission</i>
IS	- <i>Intelligibility Score</i>
ISO	- <i>International Organization for Standardization</i>
MLP	- <i>Multilayer Perceptron</i>
MPM	- Método Profile Modificado
MPM-z	- Significância do MPM na escala z
MTF	- <i>Modulation Transfer Function</i>
NC	- <i>Noise Curve</i>
NPS	- Nível de Pressão Sonora
PB	- <i>Phonetically Balanced Words</i>
PCA	- <i>Principal Component Analysis</i>
PG 06 Eng. Mec.	- Sala PG 06 da Engenharia Mecânica
PM	- <i>Profile Method</i>
RF	- Ruído de Fundo

RLM	- Regressão Linear Múltipla
RNAs	- Redes Neurais Artificiais
RSR	- Relação Sinal Ruído
SFS	- <i>Finnish Standards Association</i>
SII	- <i>Speech Intelligibility Index</i>
SNR	- <i>Signal to Noise Ratio</i>
STI	- <i>Speech Transmission Index</i>
TR	- Tempo de Reverberação (T60)
Ts	- Tempo Central
WHO	- <i>World Health Organization</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

®	- Marca registrada
Σ	- Somatório de números
©	- Copyright
L_p	- Nível de Pressão Sonora (dB)
$L_{eq,T}$	- Nível de pressão sonora contínuo equivalente (dB)
L_{eq}	- Nível de pressão sonora equivalente
p_{ref}	- Pressão de referência
AL_{cons}	- <i>Articulation Loss of Consonants</i>
C50	- Claridade (dB)
D50	- Definição
G	- Intensidade/Força (dB)
LA_{eq}	- Nível de Pressão Sonora Equivalente ponderado em A
LF	- Distribuição Espacial Lateral
U50	- Razão de Som Útil-a-Prejudicial
$E(t)$	- Energia da curva de decaimento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	JUSTIFICATIVAS	22
1.2	OBJETIVOS	23
1.2.1	Objetivo geral	23
1.2.2	Objetivos específicos.....	23
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	24
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	26
2.1	DEFINIÇÕES DAS VARIÁVEIS DO CAMPO ACÚSTICO	26
2.1.1	Nível de Pressão Sonora.....	26
2.1.2	Frequência	27
2.2	ACÚSTICA DE SALAS.....	28
2.2.1	Resposta Impulsiva	28
2.2.2	Absorção sonora	30
2.3	DESCRITORES ACÚSTICOS DE SALAS	33
2.3.1	Ruído de Fundo (RF) e Curvas de Ruído (NC)	33
2.3.2	Tempo de Reverberação – TR	34
2.3.3	Tempo de Decaimento Inicial (EDT).....	37
2.3.4	Claridade – C50, Definição – D50 e Tempo Central (Ts)	38
2.4	ÍNDICE DE TRANSMISSÃO DE FALA (STI)	39
2.4.1	Formulação do STI	40
2.4.2	Cálculo do STI com base na MTF	42
2.5	RAZÃO DE SOM ÚTIL-A-PREJUDICIAL (U50)	45
2.6	NORMATIVAS DOS DESCRITORES	46
3	REVISÃO DA LITERATURA	49
3.1	EFEITOS DO RUÍDO NA RELAÇÃO ENSINO APRENDIZAGEM	49
3.2	EVOLUÇÃO DAS MÉTRICAS DA INTELIGIBILIDADE DE FALA.....	51
3.2.1	Medições subjetivas e preditivas paramétricas	51
3.2.2	Medições objetivas - STI	53
3.2.3	Correlações entre inteligibilidades subjetivas e objetivas.....	54
3.3	APLICAÇÕES DO STI EM SALAS DE AULA	56
3.4	INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS ACÚSTICOS SOBRE O STI.....	57
3.4.1	Correlações entre o STI e Relação Sinal Ruído (RSR).....	58

3.4.2	Correlações entre o STI e Tempo de Reverberação (TR).....	60
3.4.3	Correlações entre STI e descritores energéticos (EDT, Ts, C50, D50)	62
3.4.4	Correlações entre STI e U50	63
4	MATERIAIS E MÉTODOS	66
4.1	MEDIÇÕES <i>IN SITU</i>	67
4.1.1	Medições do STI	67
4.1.2	Medições do T30, EDT, C50, Ts e D50	70
4.2	MODELAGEM ACÚSTICA DAS SALAS	72
4.3	PLANEJAMENTO FATORIAL DE EXPERIMENTOS.....	74
4.4	ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS	79
4.5	REDES NEURAIS ARTIFICIAIS	83
4.5.1	Características da rede empregada	84
4.5.2	Método Profile Modificado - MPM	89
5	RESULTADOS.....	92
5.1	VISÃO GERAL DAS SALAS DE AULA SELECIONADAS	92
5.2	RESULTADOS DAS MEDIÇÕES E SIMULAÇÕES DAS SALAS	93
5.2.1	Medições do RF, NC, T30, EDT, C50, D50 e Ts.....	93
5.2.2	Medições do STI	95
5.2.3	Modelagem acústica das salas	96
5.3	EFEITO DA DISTÂNCIA ENTRE A FONTE E O RECEPTOR.....	100
5.4	PROCEDIMENTO DE AVALIAÇÃO DE SIGNIFICÂNCIA E CORRELAÇÕES	
	105	
5.4.1	Procedimento para a obtenção dos postos de significância.....	106
5.4.2	Análise da aplicação do ACP sobre as matrizes do DOE	107
5.4.3	Análises de significância via DOE e MPM.....	110
6	DISCUSSÕES.....	116
6.1	AVALIAÇÃO NORMATIVA DAS SALAS	116
6.2	ANÁLISES DE CORRELAÇÃO ENTRE OS DESCRITORES.....	121
6.3	ANÁLISES DOS EFEITOS.....	124
6.3.1	Comparação do posto de significância dos efeitos frente a literatura	129
6.3.2	Compêndio das análises sobre a qualidade acústica das salas.....	130
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	131
7.1	CONCLUSÕES	131
7.2	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	133

REFERÊNCIAS.....	134
APÊNDICE 1 – FOTOS DAS SALAS DE AULA	143
APÊNDICE 2 – COEFICIENTES DE ABSORÇÃO DAS SUPERFÍCIES	145
APÊNDICE 3 – VALORES DE STI MEDIDOS VERSUS SIMULADOS	147
APÊNDICE 4 – PROGRAMAS MATLAB®	152
APÊNDICE 5 – VALORES NOMINAIS DOS EFEITOS.....	157

1 INTRODUÇÃO

As salas de aula são os ambientes em que as pessoas passam seu tempo de aprendizagem, desde alfabetização até as universidades. Estas imprimem na sociedade uma importância que reflete na qualidade de vida de uma nação, por cumprir o papel do local da transmissão, construção e desenvolvimento de conhecimentos. Ou seja, o ambiente escolar é um ente principal, que contribui para o estabelecimento de uma nação soberana.

Notadamente, o ruído em salas de aula interfere fortemente na relação ensino-aprendizagem e pode causar, sob certas circunstâncias, riscos à saúde. Diversos efeitos negativos estão presentes, dos quais se destacam os efeitos psicofisiológicos, tais como o estresse e aumento da pressão arterial (HUSTIM, 2018). Além disso, manifestam-se alterações nos limiares auditivos, zumbido, fadiga, demasiado esforço para manter concentração e a perda de parte do conteúdo ensinado. Muitas vezes, este ruído compete com a voz do professor, o que promove uma baixa taxa de inteligibilidade nestes ambientes, resultando na perda da compreensão de números e palavras em sentenças complexas. Este efeito, revela-se acentuado em alunos de nível de alfabetização e em classes iniciais da vida escolar (YANG; BRADLEY, 2009; MUSACCHIA et al., 2018).

Em ambientes universitários, o ruído interfere fortemente na comunicação verbal, ao gerar duas classes principais de problemas: (i) perda da eficiência na retenção de conhecimento por parte do alunado e (ii) estresse e danos nas cordas vocais dos professores que, ao tentarem sobrepor a acústica deficitária das salas, aumentam o nível de intensidade da voz. Além disso, verificam-se altos níveis de poluição sonora nestes ambientes escolares (ZANNIN et al., 2013; PENG; ZHANG; WANG, 2018).

Num sentido mais amplo, a efetividade com que se transmite sentenças de uma fonte até um receptor dentro de um campo acústico definido, interfere não somente com atividades educacionais, mas também, com as atividades de cunho laboral, impactando diretamente no desempenho dos trabalhadores e na saúde destes. Assim sendo, riscos laborais estão também associados às atividades executadas em ambientes altamente ruidosos (AUGER et al, 2018).

Dessa forma, por certo viés, as abordagens acústicas clássicas buscavam caracterizar o projeto ótimo de salas para fala através do descritor Tempo de

Reverberação (TR), sendo este um dos mais consagrados e aplicados ao longo do século XX. Todavia, dadas as características psicológicas e fisiológicas do som, este descritor possuía severas limitações, não podendo ser uma métrica para casos mais complexos. Neste sentido, foram desenvolvidas diversas métricas subjetivas e objetivas, para a quantificação e identificação de descritores que pudessem mensurar a qualidade acústica das salas, ao ponderar efeitos exógenos não considerados no cálculo do TR. O principal descritor objetivo para mensurar a qualidade da transmissão da fala é conhecido com Índice de Transmissão da Fala ou, em inglês, *Speech Transmission Index* (STI), o qual será alvo de estudo deste trabalho (HOUTGAST et al., 2002).

1.1 JUSTIFICATIVAS

Pesquisas ao longo de décadas consolidaram a fundamental importância de se estabelecer boa qualidade acústica em salas de aula. Isso tem se dado atrelando uma dependência funcional entre suas características construtivas, arquitetônicas e fatores que dependem majoritariamente da localização do estabelecimento escolar, em regiões com elevada exposição de ruído.

Diversos descritores acústicos foram propostos. Sendo que muitos deles se baseando em aspectos de razões energéticas da propagação do som, sob a teoria de difusão do som em campos acústicos definidos. Estes descritores foram, em sua maior parte, normatizados internacionalmente, ou foram implementados na forma de legislação específica ou recomendações técnicas. Citam-se nessa classe, os descritores, Tempo de Reverberação (T30), Definição (D50), Claridade (C50), Tempo Central (Ts) e Tempo de Decaimento Inicial (EDT) normatizados pela ISO 3382:1-2009 (ISO, 2009). Outros descritores correlacionavam-se com aspectos estritamente subjetivos da fala e da percepção do som, sendo que nesta classe, incluem-se as Curvas de Ruído (NC), e Razão de Som Útil-a-Prejudicial (U50) e questionários de inteligibilidade da fala.

Notadamente, o STI é o descritor mais consolidado para mensurar inteligibilidade de forma objetiva. Dessa forma, dada a enorme gama de descritores na literatura, muitos estudos objetivaram quantificar as possíveis correlações entre estes e o STI. Diversos trabalhos apresentaram discussões de estudos de casos, fornecendo indícios de certas falhas ou inconsistências teóricas entre os descritores

de inteligibilidade da fala, e como estes podem variar nas mais diversas condições. Outro fator importante é que estes trabalhos buscam compreender como cada um destes descritores varia em função das características construtivas e ocupacionais.

Desta forma, reconhecendo esta tendência na literatura, torna-se fundamental determinar estatisticamente quais são os fatores mais significantes correlatos com a acústica de salas e o respectivo impacto na inteligibilidade. Além das tradicionais técnicas numéricas analíticas e *softwares* especializados, faz-se útil aplicar também as modernas técnicas de inteligência artificial, representadas pelas Redes Neurais Artificiais. Estas atuam em sistemas altamente não lineares e multidimensionais, em que notadamente a acústica pertence. Inúmeros benefícios desta identificação de significância deverão surgir, contribuindo de forma inédita no desenvolvimento de melhores projetos acústicos em salas de aula.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar a qualidade acústica de 5 salas de aula da Universidade Federal do Paraná (UFPR), no campus do Centro Politécnico, em termos do Índice de Transmissão da Fala (STI) (IEC, 2011) e demais descritores acústicos presentes na ISO 3382:1-2009 (ISO, 2009), de modo a determinar os fatores mais significantes e aferir possíveis redundâncias nestes parâmetros, conforme a variação das condições das salas.

1.2.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral, foram elencados os seguintes objetivos específicos, apresentados em ordem sistematizada, visando atingir o objetivo geral:

- a) selecionar e caracterizar as salas de aula, através de seus coeficientes de absorção sonora e de suas características construtivas;
- b) medir experimentalmente em cada sala os descritores acústicos STI, T30, EDT, D50, C50 e Ts seguindo as especificações das respectivas normas.

- c) simular os descritores acústicos STI, T30, EDT, D50, C50, Ts e U50 e validar as simulações das salas medidas, aplicando o software ODEON versão 11;
- d) realizar o estudo de significância e análise de redundância sobre os resultados experimentais e simulados, avaliando os parâmetros dos itens “b” e “c”;
- e) definir o delineamento do Planejamento Fatorial de Experimentos para estudar as intercorrelações e as intracorrelações entre os descritores: STI, T30, EDT, D50, C50, Ts e U50;
- f) implementar as Redes Neurais Artificiais e o Planejamento Fatorial de Experimentos num estudo de agrupamento de significância dos descritores frente aos fatores A: Ruído, B: Absorção do Teto, C: Confinamento e D: Audiência, incluindo as interações de 2^a, 3^a e 4^a ordem entre estes;
- g) consolidar os resultados obtidos e fazer análises de confronto para verificar se as correlações obtidas estão de acordo com a literatura. Investigar a disposição dos fatores controláveis, sobre os descritores e comparar estes resultados com a literatura. Avaliar a situação acústica das salas segundo normas nacionais e internacionais.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho foi estruturado de forma a construir um texto organizado de forma linear, provendo os modelos e justificativas de item a item, com o agrupamento em seções.

O Capítulo 2 apresenta a Fundamentação Teórica dos conceitos apresentados na revisão da literatura.

No Capítulo 3 é realizada a Revisão da Literatura, em que se expõe o estado da arte sobre a avaliação acústica de salas de aula. Busca-se verificar as possíveis tendências nas pesquisas sobre o estudo do STI e sua correlação com os demais descritores acústicos, aplicados em acústica de salas.

O Capítulo 4 contém o desenvolvimento da Metodologia e a descrição das normas pertinentes ao trabalho. A metodologia é apresentada de forma esquemática, mostrado na FIGURA 12. Os métodos foram descritos em detalhes. Separou-se os métodos de análises em subseções.

No Capítulo 5 são mostrados os resultados. Este capítulo, é estruturado de forma a dispor as análises e os resultados separadamente, em função das técnicas em estudo.

O Capítulo 6 apresenta a discussão dos resultados, que são divididos em duas principais seções: 1) discussões normativas do conforto acústicos das salas e 2) as análises estatísticas das correlações, redução dimensional e o estudo de significância dos fatores controláveis.

O Capítulo 7 sintetiza as principais conclusões do trabalho e propõe-se futuras investigações.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentadas as definições dos termos aplicados no desenvolvimento deste trabalho. A apresentação divide-se em três partes: (i) Definições dos parâmetros acústicos para a avaliação do conforto acústico de salas; (ii) Definição e formulação do STI (iii) Apresentação dos valores de referência para os descritores acústicos, segundo as normas pertinentes.

2.1 DEFINIÇÕES DAS VARIÁVEIS DO CAMPO ACÚSTICO

Na teoria do campo acústico difuso, isto é, aquele em que se considera a difusão da energia sonora ocorre de forma igual em todas as direções, dentro de um recinto, existem algumas variáveis que caracterizam acusticamente este campo. A pressão sonora e a frequência são as variáveis básicas.

2.1.1 Nível de Pressão Sonora

Segundo Harris (1994), em acústica é usual representar grandezas físicas, tais como pressão, intensidade e potência sonora por meio de uma escala logarítmica adimensional de base 10, que é conhecida como escala decibel. Essa escala é dada pela razão entre determinado nível e um valor de referência normalizado.

Com a representação de grandezas físicas em escala logarítmica, Long (2014) afirma que o Nível de Pressão Sonora (NPS) ou (L_p) é um dos descritores mais utilizados, devido à sua correlação com a percepção subjetiva de sonoridade medida em fones. Esta está diretamente ligada ao limiar de sensibilidade do ouvido, conforme a variação da pressão sonora. A pressão sonora percebida pelo ouvido humano está dentro da faixa de 20 [μ Pa] a 1×10^8 [Pa], sendo, portanto, uma faixa de valores extremamente ampla. O L_p é então definido como

$$L_p = 10 \log_{10} \left(\frac{p}{p_{ref}} \right)^2 \quad (1)$$

em que L_p é o Nível de Pressão Sonora [dB], p é a pressão sonora em Pascal [Pa], e p_{ref} é a pressão de referência, cujo valor é 20 [μPa] ou 2×10^{-5} N/m². Com a representação da pressão sonora na escala decibel, a faixa de valores da percepção comprime-se entre 0 dB e 130 dB.

A Equação (1) pode ser compreendida como o nível instantâneo da pressão sonora. Porém, em geral, as medições são realizadas ao longo de determinado período. Com isto, há a necessidade de calcular um valor do nível de pressão sonora equivalente. Este valor é conhecido como Nível de Pressão Sonora Equivalente Contínua, e é calculado analiticamente, como

$$L_{eq,T} = 10 \log_{10} \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{p(t)}{p_{ref}} \right)^2 dt \quad (2)$$

em que $L_{eq,T}$ é o Nível de Pressão Sonora Equivalente Contínua [dB], t é o tempo instantâneo [s]; T é o intervalo de tempo de integração, de t_1 a t_2 ; $p(t)$ é a pressão no instante t e p_{ref} é a pressão de referência [Pa] (MURPHY; KING, 2014).

Na prática, a aquisição dos sinais acústicos é realizada de forma digital, configurando assim uma aquisição discreta. Com isto, a integração da Eq. (2), deve ser realizada de forma numérica. Segundo Long (2014, p. 100), o equivalente da Eq. (2) para sinais discretos, é dado por

$$L_{eq} = 10 \log_{10} \frac{1}{N \Delta t} \sum_{i=1}^N 10^{\left(\frac{L_i}{10}\right)} \Delta t = 10 \log_{10} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{\left(\frac{L_i}{10}\right)} \quad (3)$$

em que L_{eq} é o nível de pressão sonora equivalente, N é o número de amostras, L_i é o valor discreto do nível de pressão instantâneo correspondente à amostra i e Δt é o espaçamento ou passo de aquisição discreta.

2.1.2 Frequência

A frequência é um importante descritor acústico. O ouvido humano possui uma sensibilidade média na faixa de 20 Hz até 20 kHz, faixa esta, denominada

espectro audível. A importância da frequência justifica-se devido à sensibilidade do ouvido não ser linear frente ao espectro audível. Com isto, o ouvido possui uma faixa de audibilidade subjetiva dos sons. Como implicação, existem faixas de frequências que são mais bem percebidas pelo ouvido independente do NPS. Esta faixa corresponde geralmente a região das frequências associadas à fala humana, na qual o maior conteúdo energético encontra-se entre 2 kHz e 5 kHz (GERGES, 1992).

Segundo Gerges (1992), para fins de instrumentação, não basta apenas realizar as medições absolutas do Leq, deve-se aplicar também filtros que tem como objetivo modelar o comportamento do ouvido humano diante da sensibilidade variável da pressão sonora em função da frequência. Estes filtros são denominados de circuitos de compensação, associados às modalidades A, B, C e D. Os valores que corrigem as medições realizadas em bandas de oitava são mostrados na TABELA 1.

TABELA 1 – CORREÇÃO DOS FILTROS DE PONDERAÇÃO EM “A”, “B” E “C”.

Frequência central	Correção filtro A [dB]	Correção filtro B [dB]	Correção filtro C [dB]
63 Hz	-26,2	-9,3	-0,8
125 Hz	-16,1	-4,2	-0,2
250 Hz	-8,6	-1,3	+0,0
500 Hz	-3,2	-0,3	+0,0
1 kHz	0,0	0,0	0,0
2 kHz	+1,2	-0,1	-0,2
4 kHz	+1,0	-0,7	-0,8
8 kHz	-1,1	-2,9	-3,0

FONTE: GERGES (1992, p. 54).

Em aplicações rotineiras de acústica ambiental, utiliza-se o filtro de ponderação em “A”. Com isto, determinado nível sonoro, que era dado em dB, é corrigido e passa a ser escrito em dB(A).

2.2 ACÚSTICA DE SALAS

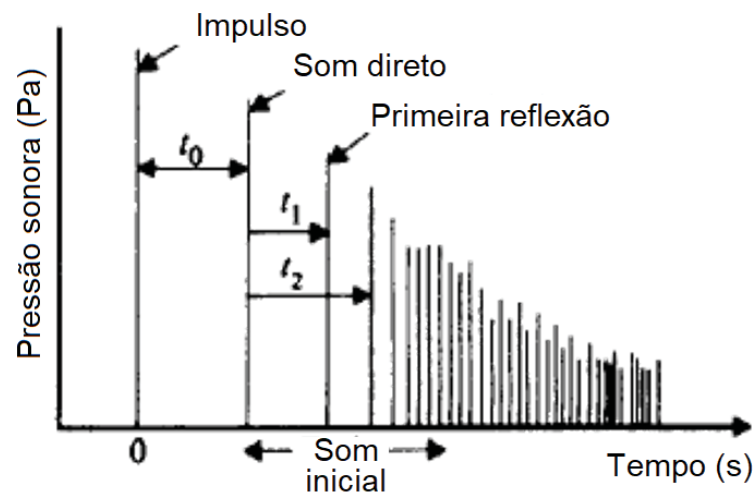
2.2.1 Resposta Impulsiva

Conforme os trabalhos presentes na literatura corrente, a qualidade acústica de uma sala é caracterizada por meio de sua resposta impulsiva. Segundo a norma ISO 3382-1 (ISO, 2009), a resposta impulsiva representa a distribuição temporal da pressão sonora devido a uma excitação do tipo impulsiva, que distribui a energia

uniformemente dentro das bandas de oitava de 63 Hz a 8 kHz no campo acústico da sala.

Com esta distribuição da pressão sonora dentro do campo acústico de uma sala excitada, calculam-se diversos descritores quantitativos, tais como TR [s], Claridade - C50 [dB], Definição - D50, Distribuição Espacial Lateral (LF), Intensidade/Força (G) [dB], Impressão e outros. Um exemplo de uma típica resposta impulsiva é mostrado por meio do espectrograma da FIGURA 1.

FIGURA 1 – ESPECTROGRAMA DAS REFLEXÕES DE ONDA EM AMBIENTE REVERBERANTE



FONTE: BRADLEY (1986, p. 840-839).

Matematicamente, a ISO 3382-1 (ISO, 2009) estabelece que a energia da resposta impulsiva deva ser integrada da seguinte forma:

$$E(t) = \int_t^{\infty} p^2(\tau) d\tau = \int_{\infty}^t p^2(\tau) d(-\tau) \quad (4)$$

em que $E(t)$ é a energia da curva de decaimento, p é a pressão proveniente da resposta impulsiva em função do tempo, t é o tempo e τ é uma variável de integração auxiliar.

Na FIGURA 1, nota-se alguns momentos distintos da distribuição da pressão sonora, expressa pela Eq. (4). Estes momentos estão associados aos estágios de chegada da energia proveniente da excitação a uma determinada posição de recepção de um ouvinte no interior da sala. Em geral, o ouvinte tem o primeiro contato

com o som direto, depois, com as reflexões do som no teto e nas paredes laterais, seguidas pela energia sonora reverberante residual da sala, até findar-se o efeito da excitação, quando o Leq atinge o valor do ruído de fundo.

2.2.2 Absorção sonora

Long (2014, p. 249) entende que, quando ondas sonoras interagem com materiais, a energia dessa onda passa por três processos: reflexão, transmissão e absorção. Com isto, pode-se criar um balanço energético, relacionando-as como

$$E_i = E_r + E_t + E_a \quad (5)$$

em que E_i , E_r , E_t e E_a são, respectivamente, as energias de incidência, reflexão, transmissão e absorção. A Eq. (5) pode ser expressa em termos de razões, ou coeficientes de reflexão e transmissão, em que se considera o coeficiente de absorção, ou transmissão, (α_θ) e o coeficiente de reflexão (α_r) dados por

$$\alpha_\theta = \frac{E_t + E_a}{E_i}; \quad \alpha_r = \frac{E_r}{E_i} \quad (6)$$

Combinando as Eqs. (5) e (6), obtém-se a relação, $\alpha_\theta + \alpha_r = 1$. Essa expressão informa que a energia que não foi absorvida/transmitida foi então refletida e vice-versa. Os coeficientes da Eq. 6 são adimensionais e decimais, podendo também ser escritos como percentuais. A sua variação é entre 0 (0% de reflexão total) e 1 (100% de absorção).

A absorção sonora é dependente da frequência. Dessa maneira, uma forma usual de apresentá-la, segundo a ISO 3382-1 (ISO, 2009), é construir uma tabela com os coeficientes de absorção segmentados em valores correspondentes às bandas de oitava centradas nas frequências de 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz e 8 kHz.

Usualmente, para estabelecer somente um valor do coeficiente de absorção, a norma técnica ASTM C423-17 (ASTM, 2017) define o Nível de Redução de Ruído, ou no seu acrônimo em inglês, *Noise Reduction Coefficient* (NRC), que pode ser compreendido como um parâmetro global, calculado como

$$NRC = \frac{\alpha_{250} + \alpha_{500} + \alpha_{1000} + \alpha_{2000}}{4} \quad (7)$$

em que α_{250} , α_{500} , α_{1000} e α_{2000} são os coeficientes de absorção para as frequências de 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz e 2 kHz, respectivamente. O valor do NRC calculado pela Eq. (7) é arredondado para a casa decimal de múltiplo mais próximo de 0,05. Como exemplo, tem-se que, se pela Eq. (7), o NRC resultou em 0,735, aplicando o arredondamento, obtém-se $NRC = 0,75$.

Hohmann, Setzer e Wehling (2004), em complemento a Harris (1994), apresentaram o descritor “A”, que representa a área de absorção (em metros quadrados) de uma sala. A área de absorção (A) é calculada como a soma dos produtos entre a área de uma superfície com seu respectivo coeficiente de absorção, ou seja,

$$A = \sum \alpha_i S_i \quad (8)$$

em que α_i é coeficiente de absorção de cada revestimento dos materiais presentes na sala e S_i é a área correspondente do material [m²]. O produto $\alpha_i S_i$ tem como unidade Sabines.

Originalmente, Harris (1994, 4.5p), recomenda que, para o cálculo da área de absorção, devem-se considerar as áreas das superfícies tais como tetos, chão e paredes laterais somadas com as áreas dos móveis e a área de absorção do ar. Por outro lado, Hohmann, Setzer e Wehling (2004) recomendam adicionar complementos para o cálculo das áreas, que podem ser incorporados na Eq. (8), conforme mostra o QUADRO 1.

QUADRO 1 – COMPONENTES NO CÁLCULO DE ÁREA DE ABSORÇÃO DE UMA SALA

TIPO DA ÁREA	DESCRIÇÃO	UNIDADE
A = A (f)	Absorção equivalente da sala	m ²
Ab = As (f)	Absorção equivalente das paredes	m ²
As = Ae (f)	Absorção equivalente dos objetos	m ²
Ap = Ap (f)	Absorção equivalente referente às pessoas na sala	m ²
1000	Absorção equivalente do ar no ambiente	m ²
f	Frequência	Hz

FONTE: GERGES (1992, p. 55).

Notadamente, o coeficiente de absorção sonora é função da frequência. Para uma sala, existe uma variedade de superfícies que contribuem de forma fracionária para a absorção total. Visando estabelecer um parâmetro global para caracterizar uma sala, face a todas estas contribuições fracionárias das superfícies, Cavanaugh, Tocci e Wilkes (2010, p. 91) apresentaram o coeficiente médio ponderado de absorção pela área das superfícies, o que é dado por

$$\bar{\alpha}_i = \frac{\sum S_i \alpha_i}{\sum S_i} \quad (9)$$

em que $\sum S_i \alpha_i$ é a área de absorção e $\sum S_i$ é o somatório das áreas.

Cavanaugh, Tocci e Wilkes (2010), por meio do coeficiente médio, mostram que é possível classificar uma sala subjetivamente, com base na frequência de 500 Hz. Essa classificação é mostrada no QUADRO 2.

QUADRO 2 – CLASSIFICAÇÃO DE SALAS VIA COEFICIENTE DE ABSORÇÃO MÉDIO.

TIPO DA ÁREA	DESCRIÇÃO
0,40	<i>Dry room</i> – Sala seca
0,25	<i>Medium-dry-room</i> – Sala medianamente seca
0,15	<i>Average room</i> - Sala média
0,10	<i>Medium-live room</i> – Sala medianamente viva
0,05	<i>Live room</i> - Sala viva
0,025 ou menor	<i>Very live room</i> - Sala extremamente viva

FONTE: CAVANAUGH; TOCCI; WILKES (2010, p. 91).

As salas consideradas secas são as salas que possuem um coeficiente de absorção médio ponderado acima de 0,40. Isso indica a presença de materiais com elevados coeficientes de absorção, o que favorece a diminuição do tempo de reverberação. Salas vivas são as salas altamente reverberantes, em que o som reflete-se mais facilmente. Os autores salientam que estas características variam com a frequência e com o volume da sala analisada.

Ao incluir materiais que absorvem considerável parte da energia sonora, o que corresponde a um coeficiente de absorção maior que 0,50, verifica-se apreciável efeito sobre a resposta impulsiva, uma vez que o coeficiente de absorção global no interior da sala pode aumentar ou reduzir as intensidades das reflexões, contribuindo para a alteração dos descritores acústicos no interior da sala. A obtenção dos descritores acústicos a partir da resposta impulsiva será mostrada na seção 2.3.

2.3 DESCRITORES ACÚSTICOS DE SALAS

Existe uma significativa gama de descritores acústicos. Estes descritores dependem majoritariamente da finalidade da medição experimental, que pode ser para isolamento acústico, nível de intensidade sonora ou outra. Além disso, as interpretações dos resultados das medições, em geral, envolvem uma parcela da compreensão sobre parte a subjetiva dos descritores, e não somente avaliar um valor numérico desconexo de uma finalidade de uso.

2.3.1 Ruído de Fundo (RF) e Curvas de Ruído (NC)

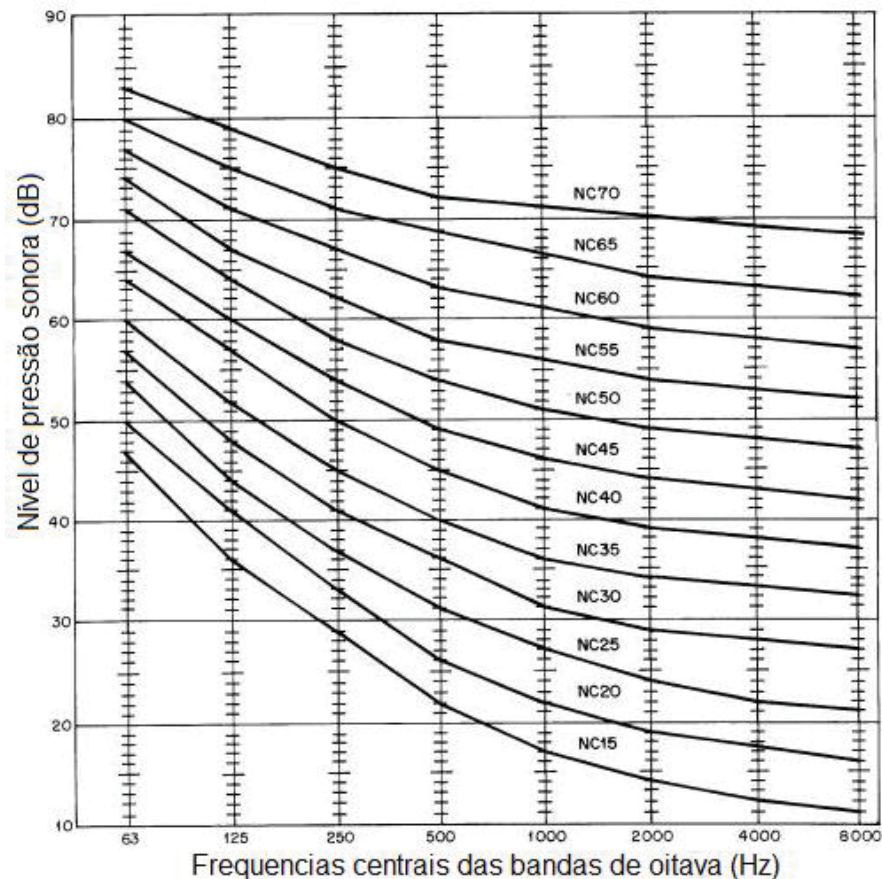
A norma brasileira NBR 12179 (ABNT, 1992) faz uma sucinta diferenciação entre os conceitos de ruído e de som. O som é uma onda mecânica capaz de produzir uma sensação auditiva, enquanto que, o ruído é uma combinação de sons cujas frequências sejam aleatórias e que não sejam compreensíveis ao ouvido humano. Com estas definições, a subjetividade da diferença entre som e ruído é revelada, fato este corroborado pela introdução de níveis de conforto e desconforto ao ruído, compilada na norma NBR 10152 (ABNT, 1987).

Para a avaliação de ruído em ambientes internos, como são os casos de salas de aula, é importante conhecer o Ruído de Fundo (RF), ou *Background Noise* (BGN). Este é compreendido como o nível de pressão sonora associado ao ruído residual, quando todas as fontes dentro do ambiente forem cessadas. Dessa forma, o único ruído será originário de contribuições externas ao meio. Harris (1994, p. 2.3) define o ruído de fundo como sendo o ruído total de todas as fontes, excetuando-se o ruído que se deseja avaliar.

Cavanaugh, Tocci e Wilkes (2010, p. 95) afirmam que Beranek (1947) foi o primeiro a propor uma métrica para avaliar o ruído de fundo em edificações, aplicando o conceito de audibilidade da curva de sensibilidade do ouvido aos ruídos em função da frequência, em bandas de oitava de 63 Hz a 8 kHz. A norma americana S12.2-2008 (ANSI/ASA, 2008) apresenta um critério denominado de Curvas de Avaliação de Salas, ou *Noise Curve* (NC), o que a norma brasileira NBR 10152 (ABNT, 1987) também faz. Um gráfico típico das curvas NC é mostrado na FIGURA 2, em que se observa que o NPS não é ponderado em “A”, embora Cavanaugh, Tocci e Wilkes

(2010, p. 95) afirmem que, para medições com o filtro ponderado “A”, os resultados são os mesmos.

FIGURA 2 – EXEMPLO DAS CURVAS DE RUÍDO - NC



FONTE: NBR 10152 (ABNT, 1987, p. 1).

A obtenção do nível NC nas bandas de oitava de 63 Hz a 8 kHz é determinado pela NBR 10152 (ABNT, 1987), a qual fornece um gráfico específico.

2.3.2 Tempo de Reverberação – TR

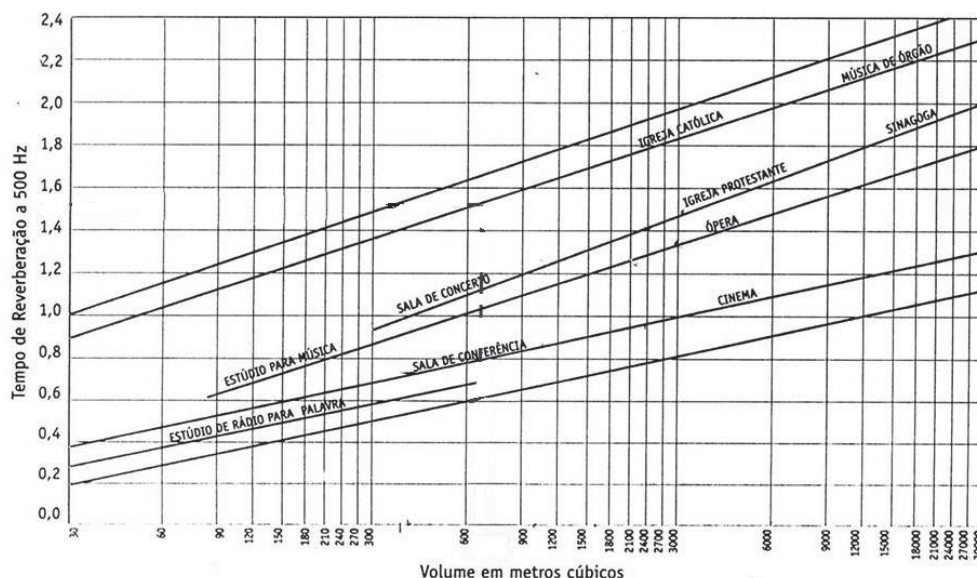
Cavanaugh, Tocci e Wilkes (2010, p. 135) reconhecem que o TR é um dos parâmetros fundamentais da acústica. Eles definem o TR para ambientes fechados como sendo o tempo necessário para que o nível sonoro de uma excitação vá sofrendo sucessivas reflexões e absorções nas superfícies do meio, tais como nas paredes, tetos e piso, até que o nível de pressão sonora dessa excitação cesse e torne-se inaudível, ou que este se iguale ao ruído de fundo ambiente.

Com essa definição, o TR é diretamente relacionado com coeficiente de absorção sonoro médio e com o volume da sala, uma vez que a quantidade de reflexões e a intensidade destas dependem das dimensões do ambiente. Consequentemente, o tempo de reverberação também é função da frequência.

Quantitativamente, a norma ISO 3382-2 (ISO, 2008) calcula o TR ou T60, como o tempo necessário em segundos [s], para que o nível de pressão sonora decaia de 60 dB. Este decaimento é baseado na extrapolação de um ajuste de curvas, aplicando o Método dos Mínimos Quadrados. O coeficiente linear de extrapolação do ajuste linear é calculado no intervalo de -5 dB abaixo do nível inicial até -35 dB abaixo do nível inicial da excitação. Este intervalo de decaimento de 30 dB, de -5 dB até -35 dB, é denominado de T30.

O TR está intrinsecamente associado à finalidade de uso à qual a sala se destina. Por exemplo, um TR considerado ótimo para atividades que envolvam a fala não é necessariamente o mesmo se a sala for usada para fins musicais. Neste sentido, a norma NBR 12179 (ABNT, 1992) apresenta um gráfico de recomendação do tempo de reverberação para a frequência de 500 Hz, em função do volume da sala e da finalidade a ela está associada. Este gráfico é mostrado na FIGURA 3.

FIGURA 3 – TEMPO DE REVERBERAÇÃO EM FUNÇÃO DA FINALIDADE DE USO



FONTE: RIGDEN (1985, pp. 840-839).

Analiticamente, pode-se estimar o TR aplicando modelos consagrados na literatura, que foram propostos pelos pesquisadores Sabine, Eyring e Arau-Puchades, cujas equações do cálculo do TR recebem os respectivos nomes de seus criadores.

A norma NBR 12179 (ABNT, 1992) apresenta as equações para os modelos de Sabine e Eyring. Elas são reproduzidas respectivamente, na Eq. (10) e na Eq. (11). Para a fórmula de Sabine,

$$t_r = \frac{0,161V}{S_1\alpha_1 + S_2\alpha_2 + \dots + S_n\alpha_n} \quad (10)$$

em que t_r é o tempo de reverberação [s], S_n são as áreas de superfícies interiores do recinto em [m²], α_n são os coeficientes de absorção sonora das superfícies do recinto e V é o volume do recinto [m³]. A fórmula de Eyring é aplicada somente quando o coeficiente de absorção médio da sala, $\bar{\alpha}_i$, for menor que 0,30 o coeficiente, $\bar{\alpha}_i$, foi definido na Eq. (9), de modo que,

$$t_r = \frac{0,161V}{-2,3S \log(1 - \bar{\alpha}_i)} \quad (11)$$

em que S é a área total das superfícies interiores do recinto [m²]

A equação de Arau-Puchades (ARAU, 1988) foi proposta em 1988, e é dada por,

$$T_r = \left[\frac{0,16V}{-S \ln(1 - \alpha_x) + 4mV} \right]^{\frac{S_x}{S}} \left[\frac{0,16V}{-S \ln(1 - \alpha_y) + 4mV} \right]^{\frac{S_y}{S}} \dots \times \left[\frac{0,16V}{-S \ln(1 - \alpha_z) + 4mV} \right]^{\frac{S_z}{S}} \quad (12)$$

em que T_r é o tempo de reverberação [s]; V é o volume [m³], α_x , α_y e α_z são as respectivas médias aritméticas dos coeficientes de absorção das paredes laterais, frontais e posterior, respectivamente; S_x , S_y e S_z são as áreas totais das superfícies do recinto, paralelas respectivamente aos eixos x, y e z; m é o coeficiente de absorção do ar e $\ln(\cdot)$ é o logaritmo neperiano.

Estudos experimentais e computacionais compararam a acurácia destes modelos, pelas abordagens experimental-analítica, experimental-simulações e analítica-analítica. Com isto, foram determinadas restrições para cada um dos modelos. Estas restrições são correlatas com o coeficiente médio de absorção sonora das salas. Mais detalhes podem ser consultados em Beranek (2006) e Passero e Zannin (2010).

Além da norma brasileira NBR 12179 (ABNT, 1992), as normas internacionais ISO 3382-1 (ISO, 2009) e ISO 9921 (ISO, 2003), a norte-americana ANSI/ASA S12.60 (ANSI/ASA, 2010), a britânica BB93 (DFE, 2015) e a finlandesa SFS 5907:2004 (SFS, 2004) descrevem em detalhes as hipóteses adotadas para estabelecer o que venha ser considerado TR ótimo, dependendo da finalidade de uso. Neste trabalho, considera-se a finalidade de uso para atividades educacionais em salas de aula no estilo auditório ou sala de conferência. Atenta-se, conforme a ISO 3382-1 (ISO, 2009), que o tempo de reverberação medido em salas de aula será influenciado pela quantidade de pessoas que estão no ambiente, devido, entre outros motivos, à absorção adicional na sala e pela interferência no campo acústico.

Para fins educacionais, o TR possui considerável variabilidade, a ponderar que muitos países adotam seus critérios subjetivos do que venha a ser o tempo ótimo. Dessa forma, para comparar o TR em nível global deve-se atentar para as recomendações dos países, as quais podem estabelecer restrições específicas. Por exemplo, a norma britânica BB93 (DFE, 2015) estabelece que o TR seja medido em salas desocupadas e sem móveis, enquanto a norma alemã DIN 18041:2004 (DIN, 2004) classifica as salas por volume, aplicando-se ábacos específicos. Os valores normativos dos descritores foram consolidados na seção 2.6 deste capítulo.

2.3.3 Tempo de Decaimento Inicial (EDT)

O Tempo de Decaimento Inicial, ou como é mais conhecido no inglês, *Early Decay Time* (EDT), expressa o tempo, em segundos, que o som reverberante proveniente da excitação demora para decair 10 dB a partir de -5 dB do som inicial (som direto). O EDT é calculado com base na extrapolação da reta que melhor se ajusta entre o decaimento de -5 dB até -35 dB, que fornece o T30, com relação ao nível máximo de excitação inicial.

A norma ISO 3382-2 (ISO, 2008) recomenda calcular o TR e o EDT, uma vez que o EDT é subjetivamente mais importante do que o TR, sendo o EDT mais correlacionado com a sensação de reverberação. Por outro lado, o TR relaciona-se mais com as propriedades (características) físicas da sala. Para sustentar esta afirmação da ISO 3382-2 (ISO, 2008), ao afirmar que o EDT é um descritor subjetivamente mais importante, alguns estudos sobre o EDT mostraram que este pode ser encarado uma métrica objetiva de inteligibilidade da fala associada a ambientes fechados, como é o caso de salas de aula (BRADLEY; SATO; PICARD, 2003).

As reflexões iniciais e os parâmetros derivados delas estão ganhando notoriedade justamente por esta capacidade de quantificar a inteligibilidade aplicando somente a curva de resposta impulsiva. Na literatura entre 2003 a 2018, muitos pesquisadores ressaltam a importância dos descritores acústicos associados a reflexões iniciais. No entanto, mesmo ressaltando a importância destes parâmetros na acústica, estes pesquisadores afirmam certa negligência no estudo das reflexões, frente à inteligibilidade (BRADLEY; SATO; PICARD, 2003; ARWEILER; BUCHHOLZ, 2011; ROMAN; WOODRUFF, 2013).

2.3.4 Claridade – C50, Definição – D50 e Tempo Central (Ts)

Os demais descritores definidos na ISO 3382-2 (ISO, 2008) são relacionados com razões energéticas são elas: Claridade – C50 [dB], Definição – D50 [adimensional], também conhecido por *Deutlichkeit*, palavra de origem alemã, e Tempo Central – Ts [ms]. Os cálculos destes descritores podem ser interpretados com razões de energias em momentos específicos dentro da resposta impulsiva. O C50 e o D50 são calculados para um tempo inicial (*early time*) correspondente a 50 ms após o fim da excitação, através das definições dadas pelas Eqs. (13) e (14), a saber,

$$C_{50} = 10 \log \frac{\int_0^{0,050} p^2(t) dt}{\int_{0,050}^{\infty} p^2(t) dt} \quad (13)$$

$$D_{50} = \frac{\int_0^{0,050} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (14)$$

onde C_{50} é a claridade, em escala [dB]; D_{50} é a definição [adimensional], $p^2(t)$ é o nível de pressão sonora, e 0,050 corresponde ao tempo de 50 ms. A integral dos denominadores, em que o limite superior é infinito pode ser compreendida como sendo realizada ao longo de um tempo suficientemente grande para que a resposta impulsiva desvaneça no recinto. Existe uma relação analítica entre o D50 e o C50, dada por,

$$C_{50} = 10 \log \left(\frac{D_{50}}{1 - D_{50}} \right) \quad (15)$$

Com relação à Eq. (15), a norma ISO 3382-2 (ISO, 2008) informa que não é necessário medir estes dois descritores simultaneamente.

O Tempo Central, ou *Central Time* (T_s), em inglês, que é o centroide da área da curva de decaimento energético, da resposta impulsiva ao quadrado. Ou seja, o T_s separa os tempos iniciais da resposta impulsiva (*early times*) e os tempos finais (*late times*), sendo por,

$$T_s = \frac{\int_0^{0,050} t p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (16)$$

A relevância destes parâmetros é evidenciada na ISO 3382-1 (ISO, 2009), a que afirma que o C50, o D50 e o T_s possuem relações com as medições do TR e com condições de inteligibilidade, fato este também notado por Cavanaugh, Tocci e Wilkes (2010, p. 137). Estas inter-relações foram discutidas em mais detalhes na seção 3.4.

2.4 ÍNDICE DE TRANSMISSÃO DE FALA (STI)

Nesta seção, tem-se como objetivo apresentar as bases da formulação matemática do STI. Isso é feito pela conceituação dos fatores de redução de modulação da fala, relacionados ao caminho de transmissão de uma função de envelope de fala da fonte até o receptor, para a constituição da função de transferência do sinal, relacionada de tal modo a uma métrica da deterioração do sinal da fala.

Esta hipótese de deterioração do sinal da fala motivou a criação do Índice de Transmissão da Fala, que é mais conhecido pelo seu acrônimo, STI, derivado do termo na língua inglesa *Speech Transmission Index*. O desenvolvimento do STI apresenta os conceitos de bandas de ruído moduladas (LONG, 2014, p. 149).

2.4.1 Formulação do STI

Harris (1994) afirma que a fala possui três características principais, quando avaliada sob a perspectiva da evolução temporal. Elas são:

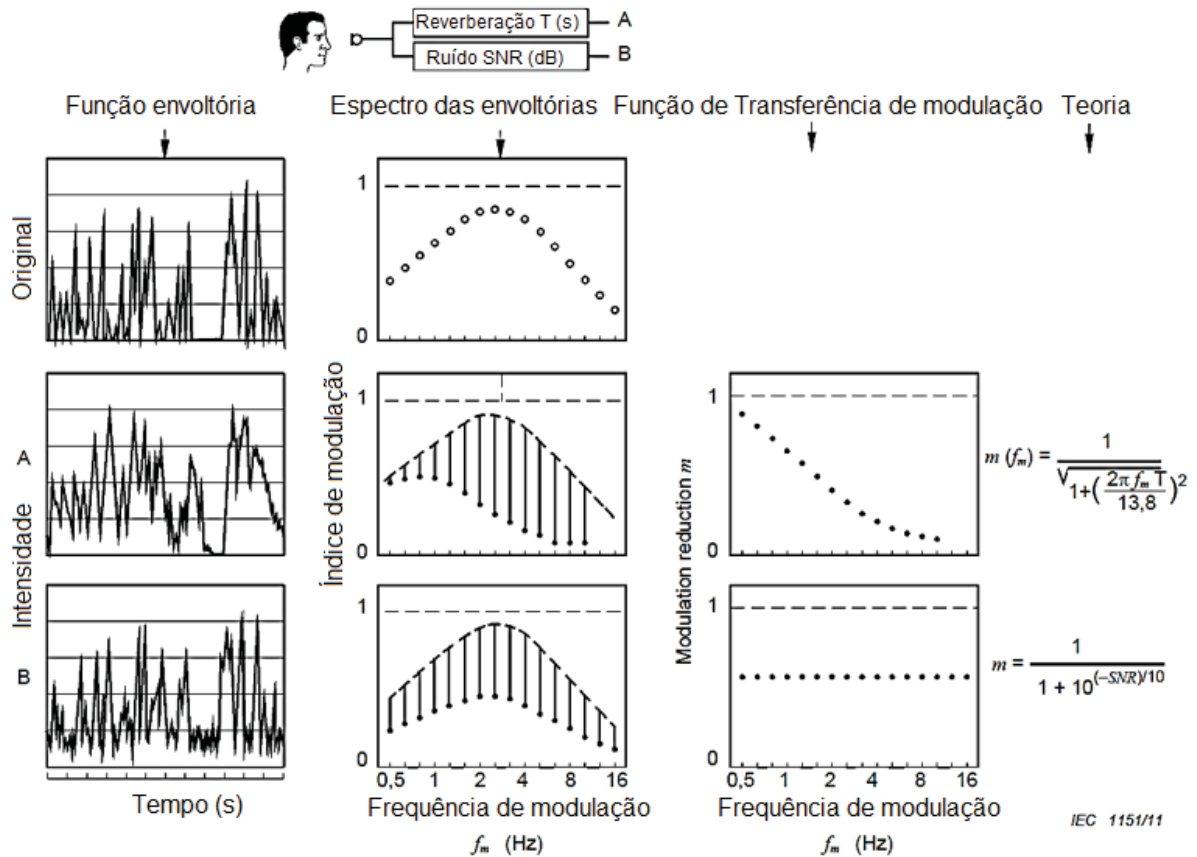
- 1) variação instantânea da pressão;
- 2) surgimento de altas pressões em pequenos espaços temporais;
- 3) surgimento de pressão que ocorre durante um tempo prolongado.

Com essa caracterização, Harris (1994, p.16.4) mostra que a fala pode ser compreendida como sucessões repetidas ou demoradas da variação da pressão, o que ele denominou de envelope de ondas, ou, simplesmente, forma de onda (*wave form*) da fala. Essas formas possuem picos, associados à pronúncia de vogais, geralmente em altas frequências, seguidos de decréscimos, o que se associa à modulação da forma de onda. Os picos e vales constituem uma modulação silábica, com pausas entre pronúncia das palavras.

A FIGURA 4 apresenta um infográfico sobre o procedimento de cálculo das funções de transferência de modulação, ou *Modulation Transfer Function* (MTF). Nesta figura, tem-se o efeito de tempo de reverberação (TR) distribuído no sinal A, e da relação sinal ruído (SNR), alocado no sinal B. O efeito sobre o espectro de envelope para cada é dado de forma individual, ou seja, separam-se os canais.

Num sentido complementar, as flutuações dos sinais de fala levam consigo considerável informação no que se refere à inteligibilidade. Estas flutuações sofrem distorções ou deteriorações durante o caminho do emissor até o receptor. Tais deteriorações são originárias das condições acústicas do meio, tais como, elevado ruído de fundo e características de reverberação do meio, conforme mostrado na FIGURA 4.

FIGURA 4 – ENVELOPE DE FALA E FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DE MODULAÇÃO



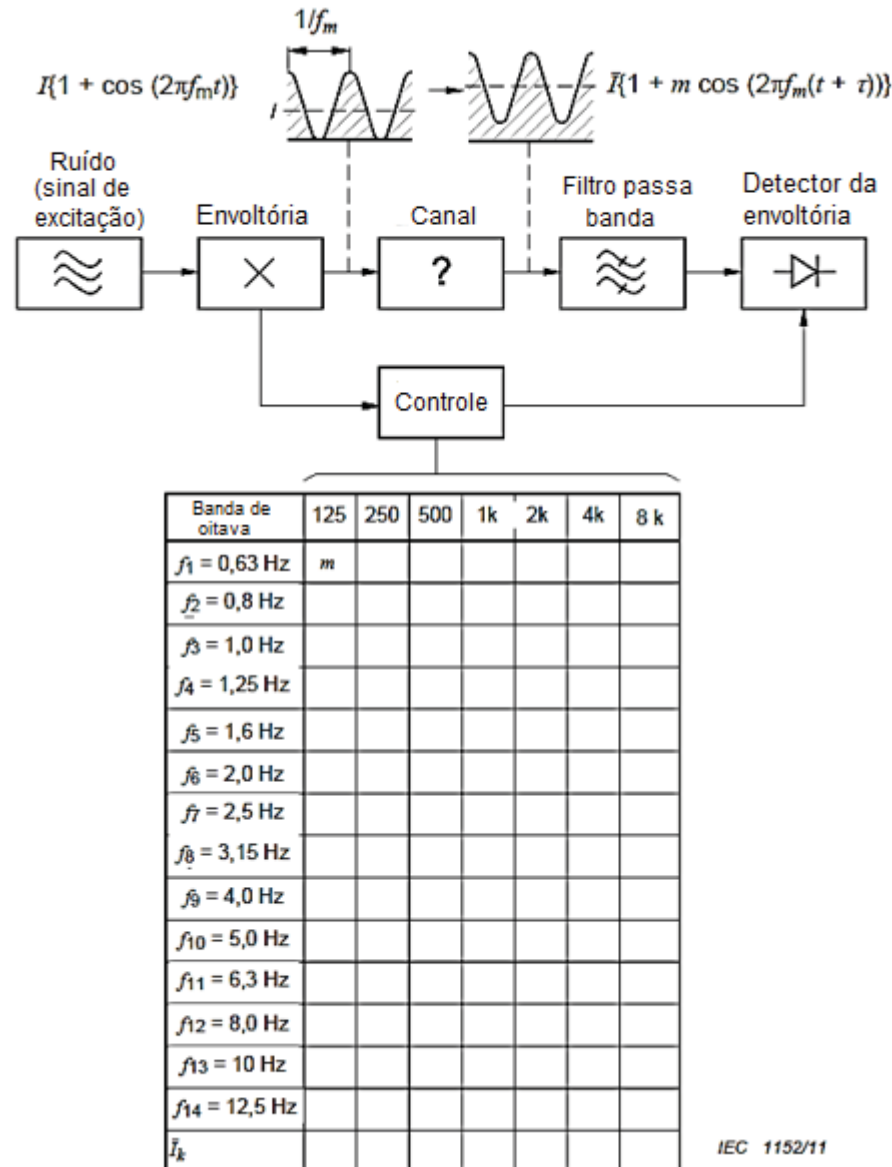
FONTE: Adaptado de IEC 60268-16 (IEC, 2011, p. 36).

Com base na FIGURA 4, para calcular os fatores de redução de modulação, $m(f_m)$, são considerados os efeitos independentes do tempo de reverberação e do ruído de fundo no recinto. O $m(f_m)$ mensura a distorção entre o sinal original e o sinal distorcido, multiplicando-se estes dois efeitos, conforme a Equação de Schroeder, Eq. (17), de modo que

$$m(f_m) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi f_m T}{13,8}\right)^2}} \frac{1}{1 + 10^{(-SNR/10)}} \quad (17)$$

em que $m(f_m)$ é fator de redução de modulação, f_m é a frequência de modulação [Hz], T é o tempo de reverberação [s], SNR é a relação sinal ruído [dB]. As frequências de modulação são dadas em bandas de 1/3 de oitava de 0,63 Hz até 12,5 Hz, no total de 14. Essas frequências são: 0,63; 0,80; 1,00; 1,25; 1,60; 2,00; 2,50; 3,15; 4,00; 5,00; 6,3; 8,00; 10,0 e 12,5 Hz, conforme mostra a FIGURA 5.

FIGURA 5 – INFOGRÁFICO SOBRE O FATOR DE REDUÇÃO DE MODULAÇÃO



FONTE: Adaptado de IEC 60268-16 (IEC, 2011, p. 38).

Considera-se que todas as 14 frequências de modulação são calculadas para as frequências de oitava de 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz e 8 kHz. O STI é calculado com base no resultante dessa matriz de frequências com 98 entradas, conforme mostra a FIGURA 5.

2.4.2 Cálculo do STI com base na MTF

Originalmente, Houtgast, Steeneken e Plomp (1980) e Houtgast e Steeneken (1984) propuseram um algoritmo para decompor os valores dos fatores de redução

de modulação $m(f_m)$ no STI. Por outro lado, a norma IEC 60268-16 (IEC, 2011) apresenta um algoritmo modificado, que contém as seguintes etapas:

- 1) filtrar o sinal de entrada para cada um dos setes filtros de bandas de oitava;
- 2) determinar a intensidade I_k em cada banda de oitava k ;
- 3) calcular as intensidades para cada frequência de modulação.

Logo, para um determinado sinal de teste, e as bandas de oitava de interesse, deve-se correlacioná-las com sinais do tipo senos e cossenos, aplicando o produto interno entre o envelope de intensidade para cada banda k e para uma função senoidal, $\sin(2\pi f_m)$ de frequência f_m , de modo a obter

$$mdr_{k,f_m} = 2 \times \frac{\sqrt{[\sum I_k(t) \sin(2\pi f_m)]^2 + [\sum I_k(t) \cos(2\pi f_m)]^2}}{\sum I_k(t)} \quad (18)$$

onde f_m é a frequência de modulação [Hz], t é o tempo [s] e $I_k(t)$ é o envelope de intensidade em função do tempo, para cada banda de oitava k . A MTF é dada pela Eq. (19), geratriz dos valores de m , que é estabelecido pela relação entre as características dos sinais modulados da fonte e da recepção. Assim,

$$m_{k,f_m} = \frac{mdr_{k,f_m}}{mdt_{k,f_m}} \quad (19)$$

em que mdr_{k,f_m} é a profundidade de modulação do sinal de teste recebido na posição do ouvinte, enquanto, mdt_{k,f_m} é a profundidade de modulação do sinal teste transmitido, que foi utilizado para excitar a sala por meio da resposta impulsiva. Ambos os sinais foram determinados para cada banda de oitava k . A IEC 60268-16 (IEC, 2011) recomenda uma correção para os efeitos de mascaramento auditivo, m'_{k,f_m} , dado por

$$m'_{k,f_m} = m_{k,f_m} \times \frac{I_k}{I_k + I_{am,k} + I_{rt,k}} \quad (20)$$

em que m'_{k,f_m} é o fator de correção do mascaramento auditivo, I_k é nível de intensidade acústica, $I_{am,k}$ é o nível acústico dependente do mascaramento e $I_{rt,k}$ é o nível acústico de recepção limitante (*threshold*). Posteriormente, com estes fatores de correção, calcula-se a relação efetiva do de sinal ruído, na escala dB, através de,

$$SNR_{\text{eff } k, f_m} = 10 \times \log \frac{m'_{k, f_m}}{1 - m'_{k, f_m}} \quad (21)$$

em que $SNR_{\text{eff } k, f_m}$ é a relação sinal ruído efetiva.

O STI é então obtido, calculando-se os valores das modulações m , conforme a Eq. (22). O STI varia entre 0 e 1, sendo que 0 (zero) significa total distorção do sinal e 1 indica transmissão da fala sem deteriorações. A equação do STI é

$$STI = \sum_{k=1}^7 \alpha_k \times MTI_k - \sum_{k=1}^6 \beta_k \times \sqrt{MTI_k \times MTI_{k+1}} \quad (22)$$

onde,

$$TI_{k, f_m} = \frac{SNR_{\text{eff } k, f_m} + 15}{30} \quad (23)$$

em que α_k é o fator de ponderação para a bandas de oitava k e β_k é o fator de redundância entre a banda de oitava k e $k + 1$. Os fatores de ponderação α_k e β_k são encontrados na Tabela A.3 da IEC 60268-16 (IEC, 2011, p. 41). Estes fatores estão relacionados a aplicação dos filtros de gênero, ou seja, filtro para a voz masculina e para a voz feminina. Em geral, conforme a IEC 60268-16 (IEC, 2011, p. 41) a voz feminina é considera mais inteligível do que a voz masculina, de tal modo usa-se o sinal de teste com a ponderação da voz masculina na maioria das vezes.

Na Eq. (23), é pertinente avaliar com o ruído de fundo relaciona-se com o nível do sinal de excitação, expressada na Eq. (21). Nota-se que, o valor do ruído de fundo de interesse somente é avaliado entre -15 dB até +15 dB. Por fim, a Eq. (24), representa os valores de MTI_k .

$$MTI_k = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^7 TI_{k, fm} \quad (24)$$

A IEC 60268-16 (2011) estabelece recomendações sobre como deve ser selecionado o sinal de excitação, assim como estabelece critérios sobre a distribuição espectral deste sinal. Os espectros de excitação devem conter sinais que mantêm relação com a forma do espectro da fala humana, em condições padronizadas, e, às vezes, requer a distribuição uniforme da energia sobre o espectro, para mais detalhes consultar a seção A.3.5 da IEC 60268-16 (2011).

2.5 RAZÃO DE SOM ÚTIL-A-PREJUDICIAL (U50)

Como mostrado nas seções anteriores, os descritores TR, EDT, C50, Ts e D50 são parâmetros energéticos associados a razões de energia em tempos pré-definidos, avaliados sobre uma curva de decaimento enérgico da resposta impulsiva (ver FIGURA 1). Notadamente, a RSR não é considerada de forma direta nos cálculos destes parâmetros, revelando assim a limitação destes descritores como métrica física de inteligibilidade da fala.

Neste sentido, Lochner e Burger (1964) propuseram um parâmetro baseando-se na hipótese da contribuição da energia do som direto inicial, “*early energy sound*”, com aqueles frutos de reflexão nas superfícies do ambiente, configurando a energia do som atrasado, “*late energy sound*”. Assim, combinando-os com a RSR, pode-se gerar um indicador de inteligibilidade, denominado originalmente de Razão de Som Útil-a-Prejudicial ou como U50.

Posteriormente, Bradley, Reich e Norcross (1999) a Razão de Som Útil-a-Prejudicial, estabeleceram a seguinte relação para o U50

$$U_{50} = 10 \log \left\{ \frac{E/L_{50}}{1 + (E/L_{50} + 1) N/S} \right\} \quad (25)$$

em que U_{50} é a Razão de Som Útil-a-Prejudicial [dB], N é a energia do ruído de fundo, S é a energia da fala (com estes valores calcula-se a RSR), E/L_{50} é a razão da energia

inicial com a energia das reflexões atrasadas para um tempo da energia inicial em 50 ms, o que é equivalente ao D50 (ver Eq. (14)), gerando assim o C50,

$$C_{50} = 10 \log \left\{ \frac{N}{L_{50}} \right\} \quad (26)$$

Jianxin e Chengxun (2010) manipularam a Eq. (25) proposta por Bradley, Reich e Norcross (1999), e, calcularam o U50 diretamente do D50 e pela RSR conforme,

$$U_{50} = 10 \log \left\{ \frac{D_{50}}{1 - D_{50} + 10^{(-RSR/10)}} \right\} \quad (27)$$

todos os termos da Eq. (27) foram definidos previamente.

Para corroborar a validade do U50 os trabalhos de Marshall (1994), Arweiler e Buchholz (2011), Roman e Woodruff (2013) que estudaram o efeito das reflexões iniciais (*early reflection*) em relação ao som direto (*Direct sound*), os autores mostram que as reflexões iniciais estão correlacionadas com a inteligibilidade.

2.6 NORMATIVAS DOS DESCRITORES

Quando se avalia o ruído de fundo por meio do descritor NC e do nível de pressão sonora equivalente, LAeq, a norma brasileira NBR 10152 (ABNT, 1987) recomenda, para salas de aula, que o nível esteja, para o LAeq, entre 40-50 dB(A), e para o NC, entre 35 - 45. Para outros países as recomendações são mostradas na TABELA 2.

TABELA 2 – VALORES RECOMENDADOS PARA RUÍDO DE FUNDO E NC

PAÍS/NORMA	NC	LAeq – dB(A)	TEMPO DE MEDIÇÃO
Brasil/ NBR 10152 (ABNT, 1987)	35 - 45	40 - 50	Não especificado
Finlândia/ (SFS 5907, 2004)	--	30	7 min à 22 min
Estados Unidos / (ANSI/ASA, 2008)	25 - 35	35	1 hora
Inglaterra / (DFE, 2015)	--	40	30 min

FONTE: O autor (2019).

Por outro lado, para o TR, a norma NBR 12179 (ABNT, 1992) recomenda o cálculo para a frequência de 500 Hz, em função do volume da sala e da finalidade de

uso, neste caso “Sala de Conferência”. Na TABELA 3, é apresentado um comparativo proposto Zannin et al. (2011), que contém um compêndio sobre os valores das legislações.

TABELA 3 – VALORES RECOMENDADOS DE TEMPO DE REVERBERAÇÃO

PAÍS/NORMA	TEMPO DE REVERBERAÇÃO	VOLUME [m ³]
França	$0,6 \leq T_{60} \leq 1,0$	$V \leq 250$
	$0,6 \leq T_{60} \leq 1,0$	$V > 250$
	$T_{60} = 0,50$	$V = 125$
Alemanha	$T_{60} = 0,60$	$V = 250$
	$T_{60} = 0,70$	$V = 500$
	$T_{60} = 0,80$	$V = 750$
Japão	$T_{60} = 0,60$	$V \approx 200$
	$T_{60} = 0,70$	$V \approx 300$
Portugal	$T_{60} \leq 1,0$: Para 125 Hz – 250 Hz	--
	$0,6 \leq T_{60} \leq 1,0$: Para 500 Hz – 1000 Hz	--
Estados Unidos da América	$T_{60} = 0,60$	$V \leq 283$
	$T_{60} = 0,70$	$283 < V \leq 566$
WHO	$T_{60} = 0,60$	--

FONTE: ZANNIN et al. (2011, p. 143).

Zannin et al. (2011) também apresentam, conforme a TABELA 4, os valores para o D50 e para o Tempo Central, com comparações dos valores recomendados.

TABELA 4 – VALORES DE REFERÊNCIA DA FALA USANDO D50 e Ts.

AUTOR /NORMA	DEFINIÇÃO – D50	TEMPO CENTRAL
Fasold e Veres (2003)	$> 50 \%$	Bom - Excelente
DIN 18041:2004 (DIN, 2004)	$\geq 50 \%$	--
ISO 3382-1:2009 (ISO, 2009)	30% a 70%	< 80

FONTE: Adaptado de ZANNIN et al. (2011, p. 145).

Quando se trata do STI, a IEC 60268-16 (IEC, 2011) não especifica diretamente quais devem ser os valores para avaliação de salas de aula. Além disso, fatores de correção dos valores recomendados do STI podem variar com a idade dos ouvintes, o idioma nativo, e a apresentação de problemas auditivos, geralmente associados a pessoas de idade superior a 60 anos. Dessa forma, na TABELA 5, mostram-se os valores recomendados pela ISO 9921 (ISO, 2003) e pela IEC 60268-16 (IEC, 2011).

TABELA 5 – VALORES QUALITATIVOS NOMINAIS DO STI.

CATEGORIA	NORMA ISO 9921:2003(E)	CATEGORIA	NORMA IEC 60268-16:2011(E)
Excelente	> 0,75	Bom - Excelente	0,75
Bom	0,60 – 0,75	Regular - Bom	0,60
Regular	0,45 – 0,60	Pobre - Regular	0,45
Pobre	0,30 – 0,45	Ruim - Pobre	0,30
Ruim	< 0,30	--	--

FONTE: ISO 9921:2003(E) (2003, p. 20) e IEC 60268-16:2011(E) (2011, p. 56).

Na IEC 60268-16 (IEC, 2011) o valor de referência para o STI em salas de aula é de $STI \geq 0,62$, apresentado na Tabela G.1, em vistas da condição de transmissão de mensagens complexas e de palavras já com certa familiarização por parte do ouvinte, o que equivale a categoria D da Tabela G.1.

Por outro lado, a ISO 9921:2003(E) mostra em sua Tabela 1, o valor mínimo de performance da avaliação de inteligibilidade, a condição de comunicação de pessoa para pessoa, o nível razoável (*fair*), com o esforço vocal máximo alto (*loud*) que corresponde ao nível $L_{s,A,1m}$ de 72 dB(A), o $L_{s,A,1m}$ é medido a 1 metro da boca, conforme a Tabela A.1. Por sua vez, o nível *fair rating* para o STI da Tabela 1 está na faixa qualitativa de 0,45 a 0,60, conforme mostra a Tabela F.1. Consequentemente, segundo a IEC 60268-16:2011(E) essa faixa corresponde ao STI a partir de 0,60. Em vista destas ponderações, fica definido neste trabalho, que o STI mínimo para uma sala de aula é de 0,60, a relação entre os valores qualitativos da ISO 9921 (ISO, 2003) e os valores quantitativos da IEC 60268-16 (IEC, 2011) é mostrada na TABELA 5 deste presente trabalho.

Além disso, a norma Britânica BB93 (DFE, 2015) recomenda, para o STI o valor mínimo de 0,60 para salas de aula. A norma Finlandesa (SFS 5907, 2004, p. 17) normatiza em classes, um padrão alto, classe A ou B, o $STI > 0,80$, e para uma classe C o $STI > 0,70$. A norma alemã DIN 18041:2004 (DIN, 2004) estabelecer o STI maior que 0,56.

3 REVISÃO DA LITERATURA

Apresentar-se-á nesta seção os efeitos que o ruído pode causar em ambientes escolares, evidenciando a importância de mitigar e identificar os danos que este pode gerar. Um enfoque é dado especificamente para contextualizar as medidas de inteligibilidade da fala, fornecendo as atuais métricas. Por fim, avaliam-se como os diversos descritores acústicos relacionam-se. Discutem-se os estudos presentes na literatura corrente que revelam as intracorrelações, intercorrelações e redundâncias entre estes.

3.1 EFEITOS DO RUÍDO NA RELAÇÃO ENSINO APRENDIZAGEM

A relação ensino aprendizagem se estabelece primordialmente pela comunicação dada de forma efetiva entre as pessoas envolvidas. Esta comunicação deve ser realizada da forma mais clara e objetiva possível, sem a influência de fatores externos. Somente assim, se estabelece uma ótima condição para a transferência de conhecimentos e informações. Para tanto, o ambiente em que esta relação ocorre tem papel fundamental.

Conforme aduziu Jerison (1959), os efeitos patológicos e psicopatológicos, tais como as percepções de estresse, nível de vigilância, fadiga e outros, que o ruído tem sobre o desempenho e nos estados fisiológicos nas pessoas não foram alvos de estudo científicos antes da década de 1940, revelando, assim, um descompasso. Jerison (1959) argumentou que, ao compreender os efeitos do ruído, isto contribuiria para identificar as possíveis patologias que interferem no comportamento e na cognição. O que auxiliaria para elevar a produtividade e bem-estar das pessoas.

Dessa mesma forma, conforme Szalma e Hancock (2011) num estudo de revisão com base em 256 trabalhos, mostrou-se que o ruído está inserido dentro de um grupo mais amplo, conhecido como estressores ambientais, aos quais incluem, por exemplo, calor, vibrações e a qualidade do ar (VAN-GEMMERT; VAN-GALEN, 1997). O ruído por sua vez possui inúmeras vertentes de quantificação, que dependem de características de intermitência, duração, repetitividade, energia, distribuição espectral e tonal, que interferem de formas diferentes a depender do contexto. Porém, de maneira geral, nota-se que o ruído, contribui para gerar condições

de perda de foco, principalmente em atividades que exigem concentração (LUNDBERG; FRANKENHAEUSER, 1978; WATTS; KHAN; PHEASANT, 2016).

Homb (2017) e Hustim et al. (2018) elencaram diversos efeitos negativos da exposição ao ruído sobre alunos em ambientes escolares.

- a) prejudica a qualidade de leitura;
- b) colabora para a perda de atenção;
- c) acelera a perda de memória de curta duração e a memória implícita;
- d) aumenta os níveis hormonais do estresse;
- e) aumenta a sensação de incapacidade de aprender.

Num sentido mais específico, voltado para os estabelecimentos escolares, o ruído possui alta influência, podendo comprometer e reduzir o desempenho em atividades que exigem a cópia e a elaboração de textos. A distorção da fala, por outro lado, também diminui o nível de compreensão das sentenças pronunciadas pelos professores, podendo gerar erros de cognição. Danos mais severos, como a gradativa perda de audição e danos nas cordas vocais, estão associadas com a exposição a ruídos durante várias horas, sendo observados em professores e em colaboradores dentro de ambientes escolares (BEHAR et al., 2004; ASTOLFI; PELLEREY, 2008; HOUTTE et al., 2011).

A Organização Mundial da Saúde (WHO, 1999), em seu relatório sobre as classificações de doenças, mostrou que a perda de audição por ruído ocupacional é a 15ª categoria de doenças que mais matam em todo o mundo. Congruente a este dado, a Agência Europeia para a Segurança e a Saúde no Trabalho (EU-OSHA, 2009), no relatório: “Segurança e Saúde no trabalho no currículo escolar: requisitos e atividades nos Estados-Membros da União Europeia” revela um plano de ação, para estabelecer medidas fiscalizatórias sobre o monitoramento do excesso de ruídos em escolas de toda a União Europeia. Dá-se enfoque particular nos problemas centrados em ambientes escolares, como exemplificados por Nelson et al. (2005).

A fim de investigar e ponderar a atual importância do estudo da influência do ruído em salas de aula, foram selecionados trabalhos que avaliaram os níveis de ruído aos quais os alunos e professores estão expostos diariamente. Nestes trabalhos, recomendações de fiscalização de medidas corretivas foram propostas, visando a segmentação de normativas que objetivam criar medidas para conter o aumento da poluição sonora, visto os efeitos negativos que esta pode causar.

Hodgson (2002) avaliou sobre quais condições tem-se a correta compreensão do que venha a ser a qualidade acústica das salas de aula, em termos de diversos descritores. Foram avaliadas 279 salas na Universidade da Colúmbia Britânica, das quais cerca de 80% tiveram em média uma classificação boa, muito boa ou excelente, em termos acústicos. Os parâmetros avaliados foram STI, EDT, RF, Nível de Pressão Sonora (NPS), e a Relação Sinal Ruído (RSR). Hodgson (2002) salientou a importância de manter uma boa qualidade acústica, pois esta afeta a percepção da fala, o que está diretamente associado ao aprendizado.

Zannin et al. (2013), realizaram um estudo transversal, no Campus Centro Politécnico da UFPR, através de medições e da confecção de mapas de ruído. Após, aplicaram-se questionários com 389 entrevistados. Os resultados dos questionários mostraram que 61% dos entrevistados citaram irritação e dificuldades de concentração devido ao ruído no campus. Este fato alinhou-se com o fato de que cerca de 90% dos pontos de medições apresentaram ruídos superiores a 55 dB(A), que é o limite estabelecido pela norma brasileira.

3.2 EVOLUÇÃO DAS MÉTRICAS DA INTELIGIBILIDADE DE FALA

A inteligibilidade de fala pode ser compreendida com a medida da fração de palavras que um ouvinte consegue compreender. Diversos efeitos acústicos podem mascarar ou deteriorar o sinal durante a transmissão da fonte até o receptor, gerando uma compreensão parcial, ou mesmo a não compreensão, das sentenças.

Múltiplos são os métodos que visam mensurar a inteligibilidade. Estes, segundo Houtgast et al. (2002), dividem-se em métodos subjetivos (Índice de Articulação), paramétricos (Perda de Articulação de Consoantes) e objetivos (Índice de Transmissão da Fala e o U50).

3.2.1 Medições subjetivas e preditivas paramétricas

Para Marshall (1994), as medidas subjetivas envolvem o cálculo da inteligibilidade, aplicando-se questionários no formato de “Testes de Palavras” para verificar a compreensão oral. Neste tipo de medida, aplica-se uma pessoa falando em nível normal, sem exaltar a voz, ou aplica-se uma fonte sonora com condições de diretividade e Leq similares a voz humana, para realizar os testes. Conforme a

quantidade de acertos e erros, calcula-se um índice de inteligibilidade da fala ou *Speech Intelligibility Index* (SII), que é representado na forma percentual entre 0% a 100%. As normas ISO 4870 (ISO,1991) e ANSI/ASA S12.60 (ANSI/ASA, 2010) tratam destes testes e dispõem em detalhes sobre as condições pertinentes.

Críticas das mais variadas surgiram ao empregar testes subjetivos para avaliar a inteligibilidade. Dentre estas, se destacam o caráter altamente subjetivo dos testes, expresso pela percepção de ouvir. Esta percepção pode ser influenciada pelo pré-condicionamento das pessoas submetidas ao teste, ou seja, se houve um treinamento prévio para familiarização com as palavras; a amplitude de idade das pessoas participantes; quantidade amostral de participantes para gerar resultados estatisticamente significativos; não correlação do teste de palavras, quando aplicado para diferentes idiomas. A inteligibilidade nestes testes não leva em consideração as condições acústicas do meio. Maiores limitações podem ser obtidas pela ISO 4870 (ISO,1991).

As medições de inteligibilidade são baseadas em parametrizações provenientes dos testes de palavras, que poderiam consistir de palavras foneticamente balanceadas ou *Phonetically Balanced Words* (PB) ou palavras pertencentes às classes de palavras igualmente balanceadas foneticamente, constituídas na forma de Consoante-Vogal-Consoante (CVC), ou palavras com fonemas balanceados do tipo Consoante-Vogal (CV). Os dois principais métodos nessa classe de métrica são o Índice de Articulação ou *Articulation Index* (AI) que leva em consideração a probabilidade de o ouvinte reconhecer tanto vogais quanto consoantes. Por outro lado, no método de Perda de Articulação de Consoantes ou *Articulation Loss of Consonants* (AL_{cons}), as palavras com vogais não são consideradas como palavras de teste, uma vez que as vogais foram identificadas como fonte de erros sistemáticos (STEENEKEN; HOUTGAST, 2002).

Houtgast e Steeneken (1984) indicaram disparidades significativas entre os testes de palavras, quando aplicadas para 11 idiomas diferentes (inglês, finlandês, francês, alemão, húngaro, italiano, holandês, maori, polaco, sueco e eslovaco). Os testes de palavras foram avaliados em 14 diferentes tipos de auditórios em duplicata. Os resultados indicaram forte influência do TR sobre os percentuais de acertos. Porém, fora destas condições, em cerca de 7 auditórios, observou-se forte correlação entre os testes de palavras com as medidas objetivas de inteligibilidade, como o STI.

Galbrun e Kitapci (2016) investigaram, simultaneamente, o impacto do TR sobre a inteligibilidade e a influência do idioma do teste, com o estudo de 4 idiomas (inglês, polonês, árabe e mandarim). Foi constatado que as condições acústicas e o idioma do teste de palavras impactam sobremaneira, nos níveis de inteligibilidade. Os autores recomendaram que apenas o uso de um descritor acústico pode ser insuficiente para o projeto de salas com uso de multilínguas.

Yang e Mak (2018) aplicaram testes subjetivos para crianças entre 13 e 15 anos, em 9 salas de aula, e adolescentes universitários entre 19 e 20 anos, em 11 salas diferentes. Ambos os grupos usaram como segunda língua o inglês. Foi evidenciada elevada variabilidade dos resultados destes testes conforme a variação da idade dos participantes. Em geral, a inteligibilidade cresceu conforme o aumento da idade média dos grupos. Para validar os testes de palavras, medidas objetivas foram consideradas, sendo que diferenças também foram notadas entre os testes subjetivos e as medidas objetivas.

3.2.2 Medições objetivas - STI

Os métodos de medições objetivos são aqueles que aplicam procedimentos padronizados e instrumentação específica, para medir a qualidade de sinais de teste padronizados. A qualidade é avaliada entre a fonte até sua chegada ao receptor. A origem destes métodos, remete-se desde a década de 1970, com evolução híbrida similar aos métodos do AI e do AL_{cons} , aos quais foram desenvolvidos como base nos trabalhos de French e Steinberg (1947) posterior a Beranek (1947).

Neste trabalho, discute-se o uso de um dos parâmetros mais consolidados e aplicados para medir objetivamente a inteligibilidade da fala, que é o Índice de Transmissão da Fala (STI). Na literatura, o desenvolvimento do STI foi atribuído aos pesquisadores Houtgast, Steeneken e Plomp (1980), os quais pela primeira vez apresentaram a ideia do uso de um formalismo matemático denominado de Função de Transferência de Modulação ou *Modulation Transfer Function* (MTF). Inicialmente, estes demonstraram que, com o uso da MTF, calculava-se a distorção de um sinal em relação ao seu estado inicial.

O que se compreende pelo termo STI sofreu gradativas modificações conforme a melhoria na qualidade da instrumentação. Todavia, em geral, sua definição segundo a IEC 60268-16 é a seguinte: “uma quantidade física representando

a qualidade da transmissão da fala em relação à inteligibilidade” (IEC, 2011, p. 6, tradução nossa). O STI tem como vantagem a inclusão em seu cálculo, de alguns efeitos geralmente não incluídos nos formalismos de diversos outros parâmetros tradicionalmente associadas com a qualidade da fala em salas. Tais parâmetros incluem o ruído de fundo, relação sinal ruído e tempo de reverberação.

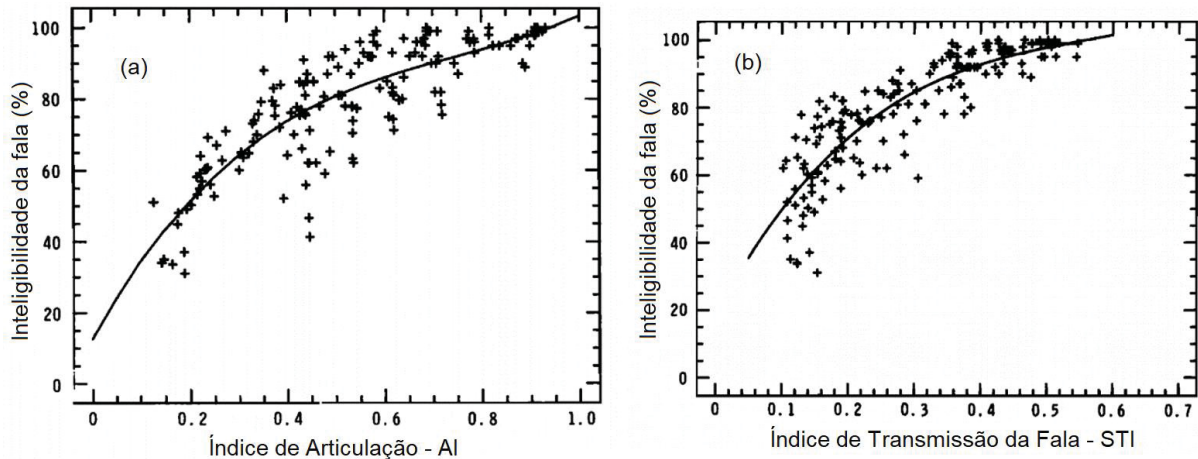
Na seção 3.4, serão expostos, em mais detalhes, estudos que mostram como o STI consegue incluir os efeitos da dinâmica do campo acústico dentro da sala, assim como ponderar efeitos exógenos, que contribuem, por exemplo, para aumentar o ruído de fundo por exemplo. Também se discorre sobre estes efeitos influenciam os valores medidos do STI.

3.2.3 Correlações entre inteligibilidades subjetivas e objetivas

Bradley (1986) mostrou o surgimento de correlações entre o AI e o Índice de Inteligibilidade mais conhecido como *Intelligibility Score* (IS). Para tanto foi aplicado o teste de palavras audiológico rítmico de Fairbanks, com combinações de 4 níveis sonoros. Ao total foram realizados 1440 testes, sendo que a idade dos participantes estudados variou entre 16 anos até a idade adulta. Não foram aplicados testes em pessoas com problemas auditivos. Na FIGURA 6, mostram-se os resultados para 140 indivíduos.

Os resultados da FIGURA 6(a) mostram forte relação entre o AI e o IS. Vale ressaltar que a relação entre o AI e o SI foi dada através do melhor ajuste com base de um polinômio de terceira ordem. Ainda no mesmo estudo, Bradley (1986) mostrou, com um polinômio de terceira ordem, a relação entre o STI e o IS, mostrada na FIGURA 6(b). Conforme os resultados das FIGURA 6, Bradley (1986) afirmou que elevadas correlações entre diversos descritores acústicos foram obtidas. Isto, portanto, fornece indícios de redundância entre estes descritores, dadas as condições das medidas realizadas nestes trabalhos.

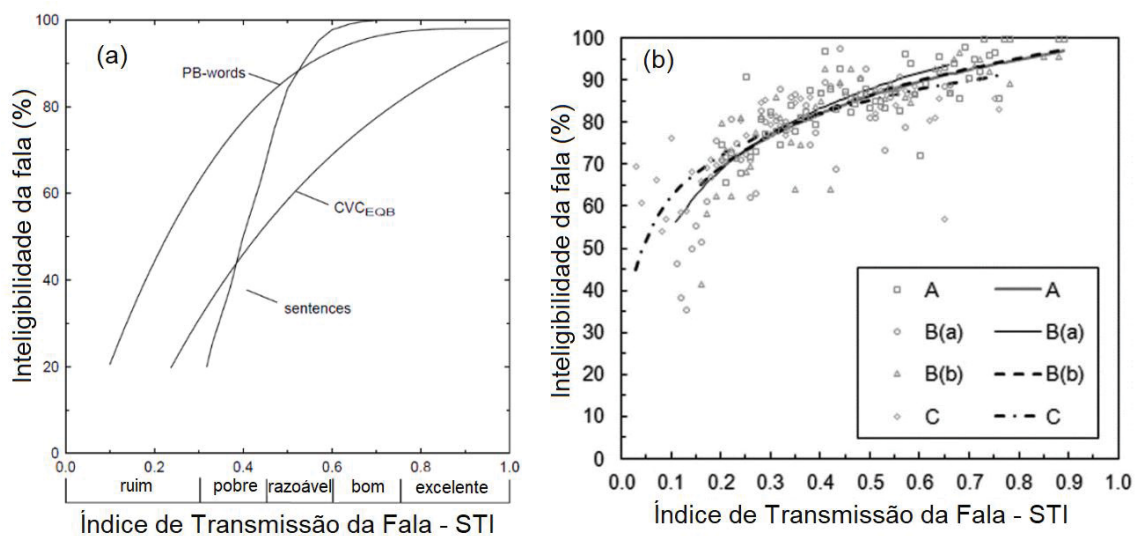
FIGURA 6 – CORRELAÇÕES ENTRE STI E MEDIDAS SUBJETIVAS DE INTELIGIBILIDADE



FONTE: Modificado BRADLEY (1986, p. 840-839).

Houtgast et al. (2002) investigaram as relações entre as métricas subjetivas e objetivas, variando as configurações dos testes subjetivos pela alteração dos conjuntos fonéticos das palavras. Aplicaram-se fonemas para palavras do tipo PB, CVC, enquanto que para as sentenças, usou-se o critério conhecido como *Speech Reception Threshold*. Astolfi, Bottalico e Barbato (2012), de forma similar a Houtgast et al. (2002), investigaram as relações entre as métricas de inteligibilidade. Dessa forma, na FIGURA 7 são apresentadas as linhas de correlação entre tais métricas.

FIGURA 7 – RELAÇÃO ENTRE A INTELIGIBILIDADE SUBJETIVA VERSUS OBJETIVA



FONTE: Modificado (a) HOUTGAST et al. (2002, p. 27). (b) ASTOLFI; BOTTALICO; BARBATO (2012, p. 252).

Os resultados na FIGURA 7, em dois estudos independentes, corroboram para demonstrar que as medidas das métricas de inteligibilidade se correlacionam. Contudo, os autores salientam que, devido às diversas configurações dos testes subjetivos, com o uso de palavras, sentenças ou números, não se pode estabelecer, de forma segura, uma relação que seja válida para todos os casos. Isto se dá pelo fato do STI também sofrer considerável variação devido às condições acústicas do meio, principalmente devido ao ruído de fundo.

3.3 APLICAÇÕES DO STI EM SALAS DE AULA

Dado o fato de o STI ser um dos descritores mais consolidados da acústica de salas, inúmeras pesquisas aplicaram o STI com o descritor de referência para avaliar a qualidade acústica de salas em ambientes escolares. A seguir, será exposto um compêndio com os principais pontos elencados na literatura para a validade do STI.

Rantala e Sala (2015) avaliaram os efeitos da acústica da sala sobre o esforço vocal de 40 professores. Para tanto, foram medidos o STI, TR, NPS, RF e EDT. Os resultados mostraram que todos os descritores acústicos correlacionaram com o esforço vocal dos professores. Especificamente, o esforço vocal aumentava conforme, diminuem as condições acústicas, associadas à qualidade da fala. Isso, no contexto deste trabalho, mostra-se pertinente, pois baixos valores de STI são prejudiciais à saúde vocal dos professores. O trabalho de Phadke et al. (2018), em escolas egípcias, mostra conclusões semelhantes.

Mikulski e Radoz (2011) mediram acusticamente 110 salas de 3 escolas primárias. Segundo os autores, nestas salas, também ocorre o uso por parte do público adulto. Os autores propuseram segmentar as análises dos resultados dos descritores acústicos, que foram o TR e o STI, para dois grupos, um com crianças e o outro com adultos, justificando uma posterior melhor interpretação dos resultados. Também foram comparadas, em análises qualitativas, os valores do STI médio de 0,61 e TR médio de 1,14 s, comparando-os com diferentes normas de 9 países. Quantitativamente, foi encontrada uma correlação de Pearson de -0,917 entre o STI e o TR. Em geral, as salas avaliadas não atingiram os requisitos mínimos segundo as normas, sendo que os autores apontaram a existência de grande variabilidade nos descritores, devido, sobretudo, às condições das salas.

Rabelo et al. (2014) realizaram um estudo comparativo entre o STI, o Nível de Pressão Sonora Equivalente ponderado em A (LAeq), o Tempo de Reverberação – T30 e testes de inteligibilidade de palavras com 273 estudantes distribuídos em 9 escolas públicas do município de Belo Horizonte - MG, totalizando 18 salas. Como conclusão, os autores indicaram que os supracitados descritores tiveram direto impacto sobre os índices de inteligibilidade da fala. Além disso, verificaram que as salas de aula, não se enquadravam nas normas internacionais de qualidade acústica para ambientes escolares.

Longoni et al. (2016) avaliaram, em salas de aula da Universidade de Córdoba, a influência do sistema de ventilação ligado ou desligado sobre o STI. Mediu-se o STI segundo a IEC 60268-16 (IEC, 2011) e o Tempo de Reverberação - T30 pela ISO 3382-1 (ISO, 2009). Ao total, 4 salas foram estudadas, com o sistema de ventilação ligado. O valor máximo registrado do STI foi de 0,51, enquanto que, com o sistema desligado, foi de 0,61. As RSR também foram medidas, em todas as condições. Segundo os autores, somente uma sala atingiu a qualidade mínima recomendada pela IEC 60268-16 (IEC, 2011).

Em geral, muitos trabalhos constantes na literatura usualmente mostram que, dentro dos grupos de salas avaliadas, o STI encontra-se em patamares não satisfatórios. Diversos fatores são apresentados, para isso incluindo, por exemplo, mas sem limitação, elevado ruído de fundo, revestimento do teto não adequado, isolamento acústico deficiente; condições de fachadas desfavoráveis e sistemas de refrigeração/aquecimento com alto ruído. Os efeitos destas correlações foram observados recorrentemente na literatura (BISTAFA; BRADLEY, 2001; NESTORAS; DANCE, 2013; SALA; RANTALA, 2016; SECCHI et al., 2017, DONGRE et al., 2017).

3.4 INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS ACÚSTICOS SOBRE O STI

Com base na seção 3.3, notou-se que, com o passar do tempo, o STI como um indicador de qualidade acústica da comunicação verbal foi sendo estudado em conjunto com vários descritores. Em muitos trabalhos, relações foram estabelecidas entre os descritores acústicos, RSR, NC, TR, C50, Ts e U50 frente ao STI. Com estas relações foram elencadas hipóteses referentes aos possíveis efeitos combinados destes descritores perante o STI. Em geral, os fatores avaliados para avaliar de forma combinada ou individual ao STI foram:

- a) tempo de reverberação – TR, T20, T30, T60;
- b) relação sinal ruído – RSR;
- c) parâmetros de energéticos - EDT, Ts, C50, D50;
- d) métrica objetiva de inteligibilidade - U50.

Neste trabalho, buscou-se estabelecer uma relação de análise qualitativa, para gerar conclusões frente a influência dos parâmetros no STI.

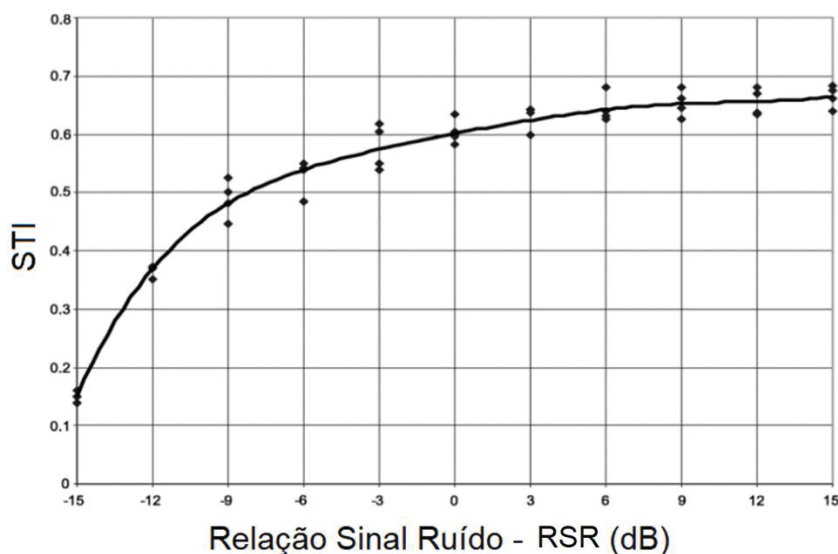
3.4.1 Correlações entre o STI e Relação Sinal Ruído (RSR)

Ponderar o efeito que o ruído provoca sobre a inteligibilidade foi um dos motivadores para o desenvolvimento do STI. A RSR em diversos trabalhos pode-se apresentar por meio dos descritores SNR, S/N e S/N(A). Apesar dessa variedade nomenclatura, a ideia geral que eles expressam é a calcular a diferença entre o nível de pressão sonora do sinal da fonte e o nível de ruído de fundo, o que corresponde na escala decibel a uma divisão.

Bradley, Reich e Norcross (1999), num estudo realizado com medições experimentais e com 16 salas simuladas. Estabeleceu nas simulações a variação da RSR nos seguintes níveis -5, 0, +5, +10 dB, adicionalmente configurou-se o nível de ruído na posição no ouvinte em 55 dB linear. As salas simuladas apresentaram uma curva NC de 40. Dentro dos parâmetros por eles avaliados, incluíram a RSR, o C50, o TR, o EDT e a U50. Os resultados mostraram que a RSR, explicou de 78% a 86% de toda a variância do STI. Além disso, considerando apenas modelos lineares, com a combinação do EDT, S/N(A) e $S/N(A)^2$ explica-se 90% da variância dos dados.

Brachmanski (2006) realizou um estudo sobre a influência da RSR frente ao STI. Neste estudo, foi realizada uma comparação entre um método subjetivo de cálculo do STI para o idioma Polonês, com o método objetivo do cálculo do STI simplificado, RASTI. Com isto, mostrou-se 100% de compatibilidade entre os dois tipos de medidas. As medidas foram realizadas em 2 salas desocupadas, sendo que, em cada uma destas, foram realizadas 4 medições do STI em diferentes posições, para simular a RSR entre -15 dB e +15 dB. Como resultado, tem-se, na FIGURA 8, o gráfico da dispersão do STI frente a RSR, em que se nota, o aumento assintótico do STI com o aumento da RSR.

FIGURA 8 – EFEITO DA RELAÇÃO SINAL RUÍDO SOBRE O STI



FONTE: Modificado BRACHMANSKI (2006, p. 174).

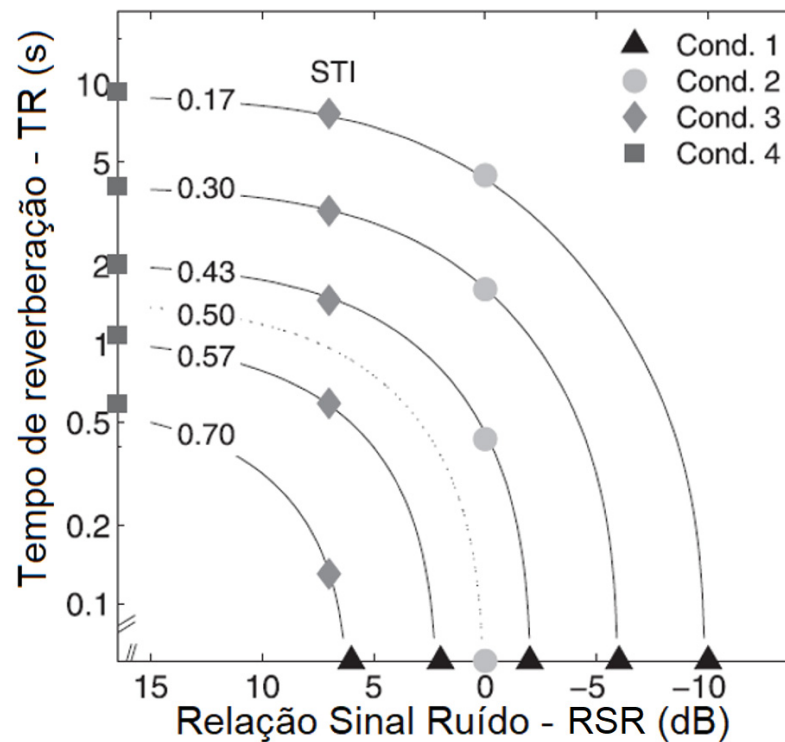
Em face do caráter psicoacústico dos testes de inteligibilidade, e de sua comprovada relação com o STI, Sakamoto et al. (2004) avaliaram num estudo o efeito da RSR com valores negativos, isto é, o sinal possui nível inferior ao nível do ruído de fundo. O nível do sinal da fala foi 60 dB, e as RSRs foram de -3, -6, -9 e -12 dB. Os resultados indicaram que quanto menores os valores da RSR menor era o percentual de inteligibilidade.

Sommerhoff e Rosas (2011) analisaram em conjunto o efeito do tempo de reverberação (TR) e a relação sinal ruído (RSR) sobre a inteligibilidade. Os autores afirmaram que, mesmo em uma sala com um ótimo TR, porém com a relação RSR negativa, a sala é acusticamente desfavorável para a fala. Os autores mostraram que é preferível uma sala com alto TR e uma RSR positiva.

De forma análoga a Sommerhoff e Rosas (2011), Rennies et al. (2014), motivados em compreender não somente o efeito da RSR, avaliaram os efeitos combinados que a reverberação e o ruído produzem sobre o STI. Com a RSR dentro da faixa de +6 dB a -10 dB, em passos de 4 dB, considerando o nível do falante em 55 dB, os autores determinaram valores de STI de 0,70; 0,57; 0,43; 0,30 e 0,17. A curva com o respectivo ajuste é mostrada na FIGURA 9. Como conclusão, foi estabelecido que elevado tempo de reverberação, em conjunto com a RSR na faixa de -15 dB a +15 dB, influenciaram para decréscimo do STI. Apesar dos resultados, os

autores sugerem cuidadosa análise futura, para melhor estabelecer as relações dos efeitos combinados.

FIGURA 9 – EFEITO COMBINADO ENTRE RSR E T60 SOBRE O STI



FONTE: Modificado de RENNIES et al (2014, p. 2645).

Assim, o ruído de fundo é fundamental para calcular a relação sinal ruído. A intensidade do sinal pode ser associada com a intensidade da fala de um professor e o ruído de fundo com o ruído produzido pelos alunos. Neste sentido, Escobar e Morillas (2015), com uma fonte omnidirecional com nível do sinal em 70 dB e com o ruído de fundo variando entre 25 dB a 50 dB, mostraram que o aumento do ruído de fundo diminui o STI.

3.4.2 Correlações entre o STI e Tempo de Reverberação (TR)

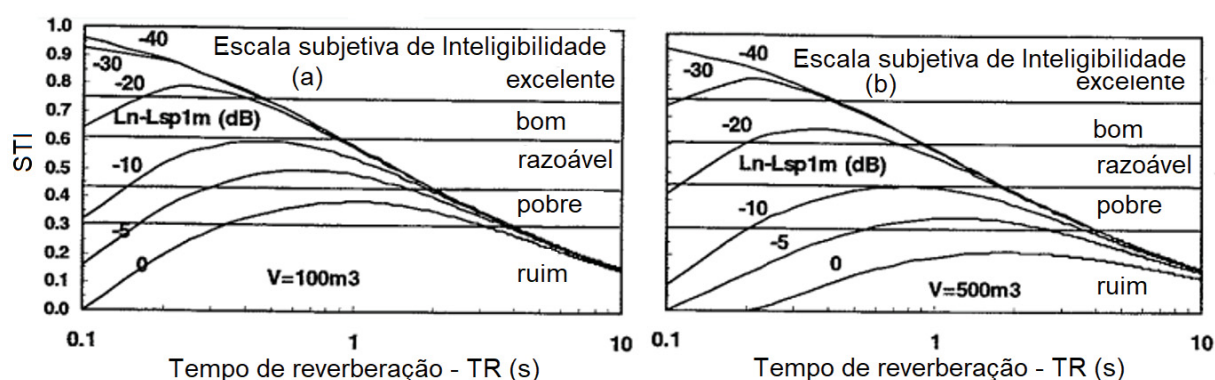
Para compreender a relação entre o STI e o TR, deve-se partir de um pressuposto que diversos fatores interferem no TR, tais como a absorção da sala, as suas dimensões, e as suas geometrias construtivas, dentre outras. Por outro lado, o

STI depende da RSR, o que induz a avaliar o STI, o TR e a RSR dentro de uma perspectiva global (RENNIES et al., 2014).

Dessa forma, podem ainda existir condições em que o TR contribua para elevar a qualidade da comunicação verbal. Em contrapartida, valores elevados de TR indubitavelmente, contribuem para uma perda da qualidade da comunicação verbal. Deve-se, no entanto, notar que o TR é um parâmetro categórico, no contexto de depender da utilidade final da sala. Neste trabalho, entende-se e discute-se o TR para situações voltadas para a comunicação verbal.

Bistafa e Bradley (2000) sumarizaram de forma combinada o efeito do tempo de reverberação, da relação sinal ruído e do volume das salas, conforme mostra a FIGURA 10. Nota-se que o STI decai à medida que aumenta o TR.

FIGURA 10 – RELAÇÃO DO STI EM FUNÇÃO DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO



FONTE: Modificado BISTAFÁ; BRADLEY (2000, p. 51).

Na FIGURA 10, observa-se também a escala subjetiva de avaliação do STI. O nível da fala para uma distância de 1 metro, na frequência de 1 kHz, foi de $L_{sp1m} = 65$ dB, sendo o ruído de fundo representado por L_n . Conforme mostra o QUADRO 3, os modelos logarítmicos, que modelaram a relação entre STI e TR, foram mais utilizados. Modelos lineares também foram aplicados, resultando em boas correlações entre o STI e TR (TANG, YEUNG, 2006; MIKULSKI; RADOSZ, 2011; KOCIŃSKI; NIEMIEC, 2016).

QUADRO 3 – MODELOS DETERMINÍSTICOS QUE RELACIONAM STI E TR

AUTORES	CONDIÇÕES	R ² *	EQUAÇÃO DO MODELO
NOWOŚWIAT e OLECHOWSKA (2016)	Simulação ODEON e medições em 4 salas	0,989	$STI = 0,649 - 0,208 \cdot \ln(TR500^{#1})$
TANG e YEUNG (2004)	Medições em 100 salas. TR em 500 Hz	0,830	$STI = 0,5895 - 0,442 \log(TR)$
ESCOBAR e MORILLAS (2015)	Medições em 17 salas	0,923	$STI = 0,778 - 0,143 \cdot TR500$
		0,971	$STI = 0,634 - 0,192 \cdot \ln(TR500)$

* Coeficiente de correlação de Pearson – R². #1TR500 é o TR na frequência de 500 Hz.

FONTE: O autor (2019).

Numa sequência de trabalhos, alguns pesquisadores, tais como NOWOŚWIAT e Olechowska (2016), Tang e Yeung (2004) de forma independente validaram os resultados de Bistafa e Bradley (2000). Foram realizadas modelagens, sobretudo, para correlacionar analiticamente os valores do TR e do STI, com as mais diversas combinações de medições e simulações.

Escobar e Morillas (2015) também corroboram com Bistafa e Bradley (2000), ao ponderarem o efeito negativo que o TR provoca sobre STI. Nestes estudos, foram avaliados resultados para a banda completa de 125 Hz a 4 kHz, com a frequência central de 1 kHz e medições em 17 salas do tipo anfiteatro.

3.4.3 Correlações entre STI e descritores energéticos (EDT, Ts, C50, D50)

Carvalho (1999) realizou um estudo de correlação dos descritores TR, EDT, C80, D50 e Ts frente ao STI. Em seu trabalho, por consequência, foram apresentados modelos para o cálculo do STI (na sua forma simplificada, RASTI) com base na correlação deste com os supracitados descritores. As correlações quadradas para a frequência de 500 Hz foram de 0,756; 0,782; 0,735; 0,705 e 0,803.

Sato et al. (2006) por meio do Grupo de Trabalho de Pesquisa em Comunicação do Discurso do AIJ (*Architectural Institute of Japan*), mantém um acervo digital com 966 salas medidas. Os resultados por eles demonstraram uma correlação entre o STI e o C50. Com isto o instituto AIJ, em nota técnica, recomenda as medições de C50, para a aferição dos níveis de inteligibilidade.

Cerdá et al. (2009), na Espanha, estudaram a acústica dos corredores com finalidades de fala, aplicando a metodologia estatística de Análise de Fatores, ou *Factor Analysis*. Foram obtidas as seguintes correlações com o STI: TR médio (média

do TR nas frequências de 500 Hz e 1 kHz), (-0,71); EDT, (-0,64); C50, (+0,84) e Ts (-0,81). Também foram gerados modelos para relacionar estes descritores.

Nestoras e Dance (2013) realizaram uma investigação sobre as intercorrelações e as intracorrelações entre o STI, EDT, T30. Foram medidas 10 salas, classificadas como pequenas, médias e grandes. Uma análise estatística descritiva com o EDT, C50, C80, D50, Ts, MTI e STI também foi realizada. Como principais resultados, foi mostrado que o C50 e o EDT correlacionaram-se com o STI, com os valores de, respectivamente 0,96 e 0,98. Nestoras e Dance (2013), identificaram que o EDT e o T30, mais especialmente o EDT, são mais sensíveis ao ruído de fundo.

Na TABELA 6, são apresentadas as relações categorizadas entre os descritores acústicos frente ao STI. Estes resultados corroboram as conclusões obtidas no estudo de Nestoras e Dance (2013).

TABELA 6 – RELAÇÕES ENTRE STI, AI, C50 e D50 QUANTO À QUALIDADE DA FALA

Categoria	STI*¹	AI*²	C50 – dB*²	D50 - %*³
Excelente	> 0,75	0,8 até 1,0	12 até 18	0,86 até 1,0
Bom	0,60 até 0,75	0,6 até 0,8	6 até 12	0,67 até 0,86
Regular	0,45 até 0,60	0,4 até 0,6	0 até 6	0,39 até 0,67
Pobre	0,30 até 0,45	0,2 até 0,4	-6 até 0	0,17 até 0,39
Ruim	< 0,30	0,0 até 0,2	-12 até -6	0,06 até 0,17

FONTE: ISO 9921 (2003, p. 20) *¹; MARSHALL (1994, p. 2252) *²; ANSAY; ZANNIN (2016, p. 3) *³

Sato, Morimoto e Wada (2012) desenvolveram uma relação analítica entre o U50 e o C50. Mas, segundo a ISO 3382-2 (ISO, 2008), o C50 também está diretamente correlacionado com o D50 de forma analítica. Logo, como corolário, o STI correlaciona-se simultaneamente com o U50, C50 e D50. De outro modo, avaliaram-se os efeitos da RSR e observou como esta está correlacionada com o STI para diferentes condições de idades, corroborando mais evidências entre o D50 e o STI.

3.4.4 Correlações entre STI e U50

Bradley, Reich e Norcross (1999), medindo os descritores C50, D50, EDT, TR, U50, AI, STI e RSR, elencaram em suas conclusões que, embora o TR seja um importante descritor, sem ponderar o feito da RSR, conseguir um TR ótimo é TR irrelevante, uma vez que, a fala é mais sensível a RSR do ambiente do que o TR.

Portanto, o U50 e o C50 correlacionaram-se melhor com as métricas de inteligibilidade, com $R^2 = 0,972$ e $0,964$, respectivamente.

Bradley, Sato e Picard (2003), em medições experimentais subjetivas de inteligibilidade, comprovaram o efeito da energia direta, avaliando as energias (direta + atrasada), e (direta + atrasada + reverberante). Em média, a inteligibilidade foi estatisticamente menor com a combinação de energia (direta + atrasada), resultado esse validado tanto para condições positivas (+5 dB) quanto negativas (-6 dB) da RSR. Outra análise, ainda no mesmo estudo, mostrou que os efeitos das energias não alteraram o TR, porém os descritores C50, D50, EDT, U50 e STI foram sensíveis a estas parcelas de energias.

Já os pesquisadores Nijs e Rychtáriková (2011) estabeleceram a relações entre as escalas do STI e do U50, como mostrado na TABELA 7.

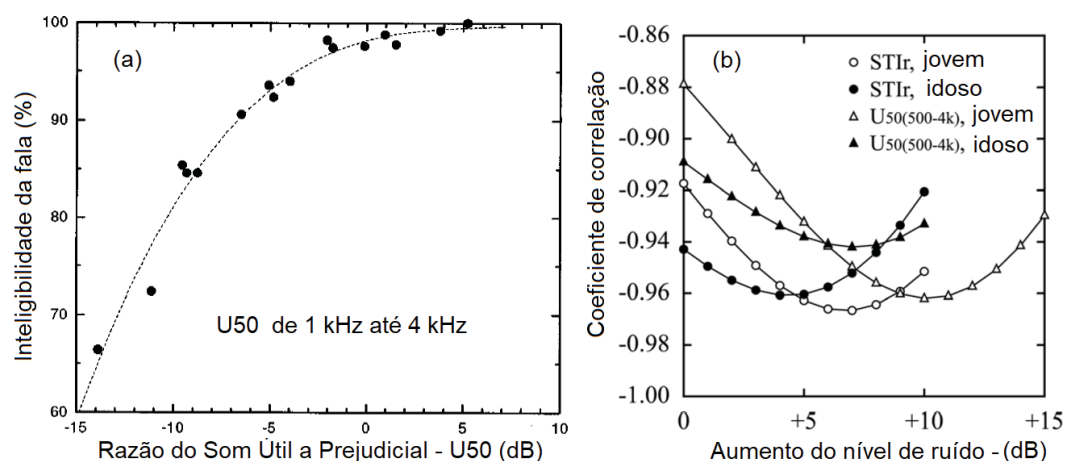
TABELA 7 – RELAÇÃO ENTRE A ESCALA DO STI E DO U50

RUIM	POBRE	ADEQUADO	BOM	EXCELENTE
STI < 0,30 U50 < -8,5	0,30 < STI < 0,45 -8,5 < U50 < -3,5	0,45 < STI < 0,60 -3,5 < U50 < 1	0,60 < STI < 0,75 1,5 < U50 < 6,5	STI > 0,75 6,5 < U50 < 11,5

FONTE: NIJS; RYCHTÁRIKOVÁ (2011, p. 97).

De mesmo modo, Sato, Morimoto e Wada (2012) revelaram forte correlação entre o STI e o U50, quando estas métricas são aplicadas em contexto de diferentes idades dos ouvintes, fazendo alusão às métricas subjetivas de inteligibilidade e o grau de dificuldade para compreender a sentenças, como mostrado na FIGURA 11.

FIGURA 11 – RELAÇÃO ENTRE STI E U50



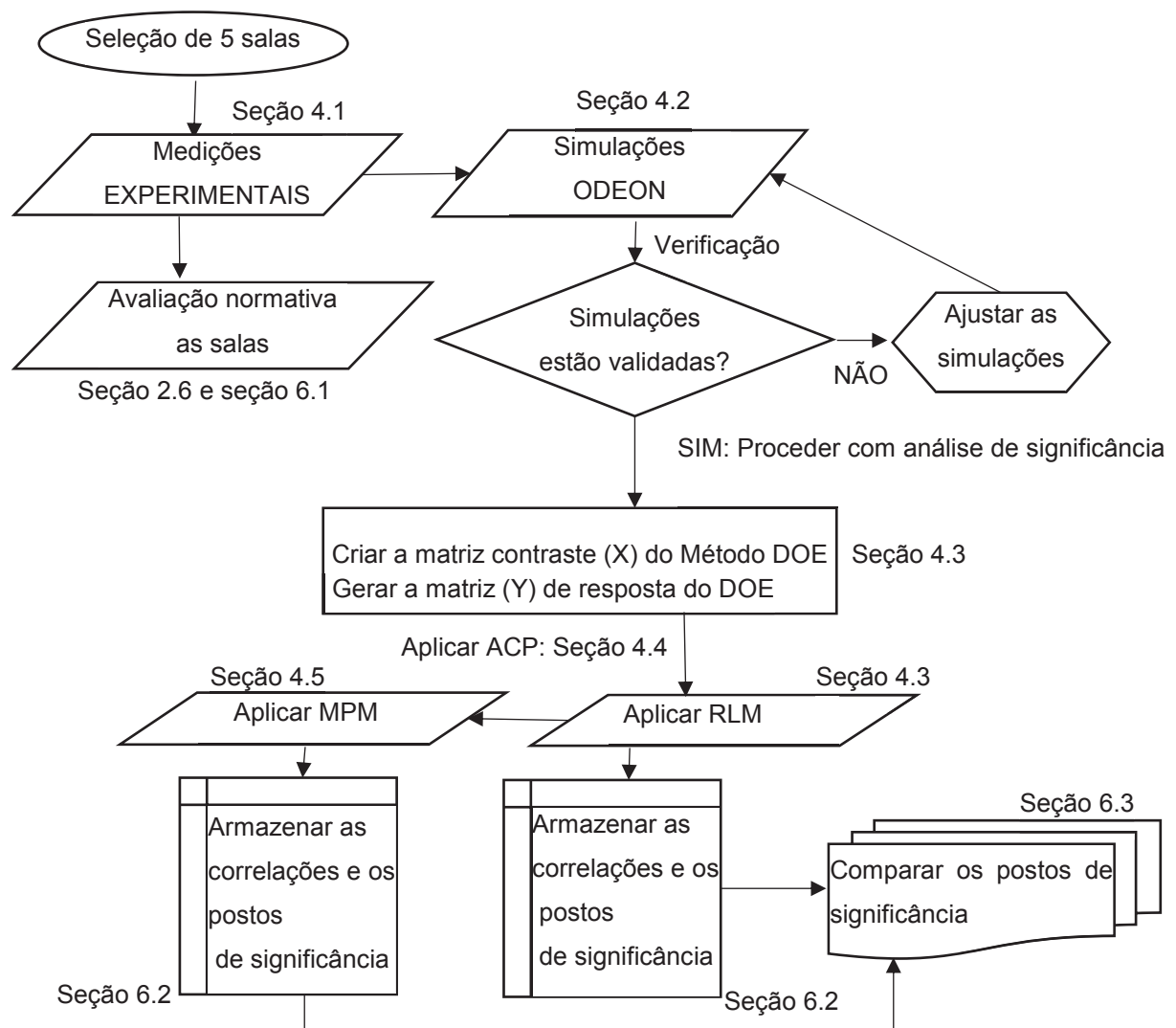
FONTE: (a) Modificado de BRADLEY; REICH; NORCROSS (1999, p.1824), (b) Modificado de SATO; MORIMOTO; WADA (2012, p. 4601).

Ademais, ainda situando-se a relevância na literatura, uma sequência de trabalhos busca qualificar a importância das parcelas subjetivas das energias diretas na percepção de inteligibilidade, principalmente mostrando que o U50 deve ser estudado devido à sua alta correlação com o STI (SATO et al., 2016; CHOI, 2017a; CHOI, 2017b).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Conforme exposto na introdução e evidenciado durante a revisão da literatura, os descritores acústicos, em muitas das vezes, correlacionam-se. Dessa forma alguns fatores da condição acústica das salas podem ser mais significativos que outros. Consequentemente, para verificar tal situação, projetou-se o procedimento metodológico mostrado na FIGURA 12.

FIGURA 12 – METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DE CORRELAÇÃO E SIGNIFICÂNCIA



FONTE: O autor (2019).

Em consonância, o presente trabalho foi estruturado em três etapas:

- a) medições experimentais dos descritores (T30, EDT, C50, D50, Ts e STI) em 5 salas de aula da UFPR no Centro Politécnico;
- b) simulações no software ODEON versão 11 dos descritores (T30, EDT, C50, D50, Ts, U50 e STI)
- c) análises sobre os efeitos cruzados de correlações e avaliação da análise de significância dos fatores de ocupação, ruído de fundo, absorção e confinamento sobre estes os descritores T30, EDT, C50, D50, Ts, U50 e STI.

O objetivo da metodologia da FIGURA 12 foi caracterizar a variação dos descritores, para verificar o impacto dos seguintes fatores: ruído de fundo via a curva NC – (A), coeficiente de absorção sonora do revestimento do teto da sala – (B), confinamento (portas e janelas abertas ou fechadas) – (C), e ocupação por pessoas (com ou sem audiência) – (D).

A escolha destes fatores, conforme aduziu Montgomery (2013), deve ser baseada em hipóteses sobre o sistema em estudo. Portanto, justifica-se a escolha de avaliar o ruído de fundo, o coeficiente de absorção sonora do teto, o confinamento, e a ocupação pois, como mostrado na seção 3.4, estes parâmetros podem impactar de maneira não linear os valores do STI. Entretanto, a avaliação em conjunto destes descritores em experimentos fatorais não foi observada na literatura corrente.

4.1 MEDIÇÕES *IN SITU*

As medições foram realizadas em salas de aula da Universidade Federal do Paraná, no Campus Centro Politécnico. Os procedimentos de medições do STI são diferentes dos descritores T30, EDT, C50, Ts e D50. As apresentações, portanto, daqueles são feitas separadamente, nas subseções 4.1.1 e 4.1.2, respectivamente.

4.1.1 Medições do STI

Para a medição do STI, foram seguidos os procedimentos recomendados pela IEC 60268-16 (IEC, 2011). Dessa forma, durante as medições, as salas estavam ocupadas apenas pelos operadores. As portas e janelas das salas, quando possível, foram mantidas fechadas, para diminuir a interferência de ruídos externos. O ruído de

fundo nas salas foi mensurado pelo analisador Brüel e Kjaer 2260 ou (B&K 2260), em bandas de oitava. O tempo de medição do ruído de fundo foi de 5 min, sendo o NC então calculado pelo analisador B&K 2260.

Para as medições do STI, foi usado a instrumentação eletrônica e de analisadores presentes no software B&K DIRAC versão 5 e no analisador B&K 2260. A instrumentação foi composta por:

- a) software DIRAC 5.0 (B&K 7841), instalado em Notebook Sony VAIO;
- b) placa de aquisição Audio Interface ZE-0948;
- c) equalizador modelo Behringer FBQ 800;
- d) amplificador Lab. Gruppen LAB 300;
- e) boca Artificial B&K 4227;
- f) analisador de nível de pressão sonora B&K 2260.

A montagem experimental é mostrada na FIGURA 13, sendo representado esquematicamente na FIGURA 14.

FIGURA 13 – MONTAGEM DO APARATO EXPERIMENTAL

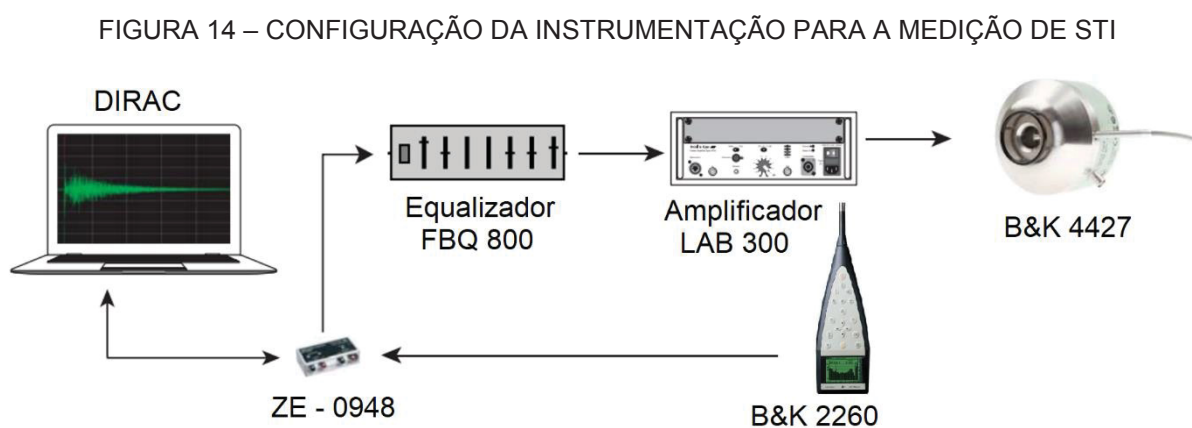


FONTE: O autor (2019).

As conexões entre os elementos da cadeia de medição foram realizadas da seguinte forma:

- a) no notebook Sony VAIO, foi conectada à sua saída USB 2.0 para a placa de aquisição Audio Interface ZE-0948;
- b) a placa de aquisição Audio Interface ZE-0948, em sua linha de entrada esquerda (Line in L) foi também conectada ao analisador B&K 2260, por um cabo P10;
- c) a placa de aquisição Audio Interface ZE-0948 foi ainda conectada com a saída de potência esquerda (Power - Out 1 L) no input R do equalizador Behringer FBQ 800, por um cabo P10;
- d) a saída Output R do equalizador Behringer FBQ 800 foi conectada com a entrada do canal A do amplificador Lab. Gruppen LAB 300 (input Ch A), por um cabo P10.
- e) a saída do canal A (output CH A) do Amplificador Lab. Gruppen LAB 300 foi conectada à Boca Artificial B&K 4227, por um cabo NL4FC, com o fio vermelho deste cabo conectado na entrada da boca com uma indicação branca.

O modelo esquemático das ligações é mostrado na FIGURA 14.



FONTE: O autor (2019).

Realizada a montagem do sistema de medição para o STI, procedeu-se com as etapas de equalização e de calibração. Segundo a IEC 60268-16 (IEC, 2011), para a equalização do espectro na saída da boca artificial B&K 4227, deve-se obter, no analisador, um espectro uniforme (plano) do nível de pressão sonora, correspondente a 60 dB para uma distância de 1 metro entre a fonte (boca artificial B&K 4227) e o receptor (analisador B&K 2260).

Procedeu-se com a equalização, seleccionando-se no DIRAC 5.0 a opção de medição (*Measure*), configurando o sinal de origem para *Internal* MLS, com o filtro da fonte sinais em *Pink + Blue*. Em seguida, seleccionou-se a opção de teste (*Test*). Com este procedimento, foram ajustados os ganhos no equalizador para o nível de referência de 60 dB, com erro na margem de ± 1 dB, para as bandas de oitava de 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz e 8 kHz.

Posteriormente, procedeu-se com etapa de calibração, dada pelo ajuste do nível de pressão sonora equivalente para o nível de 60 dB(A), a uma distância de 1 metro entre a boca artificial e o analisador. O filtro do sinal na fonte foi modificado para *Male*, com espectro correspondente à fala de um homem de nível normal. O ajuste do nível foi realizado regulando a intensidade na saída do amplificador.

Efetivadas as etapas de montagem, equalização e calibração, passou para a etapa de medições. As condições operacionais para as medições, segundo a IEC 60268-16 (IEC, 2011), foram as seguintes:

- a) a boca artificial B&K 4227 foi colocada na posição usual do professor para cada sala, com 1,50 de altura em relação à base de sustentação;
- b) a altura do receptor, analisador B&K 2260, foi de 1,20 em relação à base de sustentação;
- c) a direção do receptor (B&K 2260) foi orientada sempre para o professor;
- d) uma varredura em vários pontos de medição foi realizada, considerando-se diversas posições dos receptores, de modo a cobrir uniformemente a área em que os alunos ficam.

Com o *software* DIRAC 5.0, calculou-se o STI e as MTFs com base na IEC 60268-16 (IEC, 2011).

4.1.2 Medições do T30, EDT, C50, Ts e D50

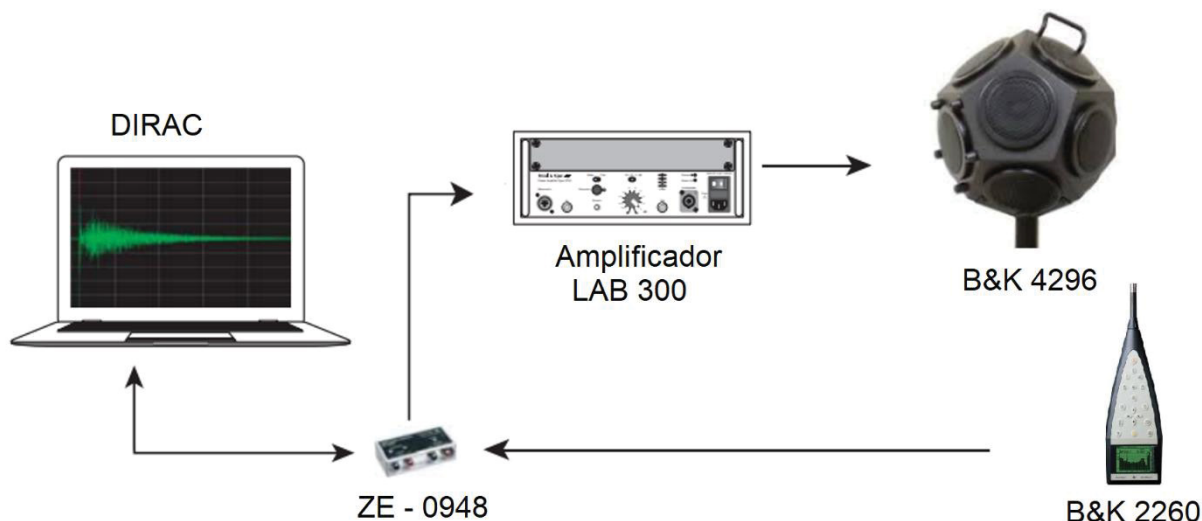
Para a medição do T30 e dos demais descritores também derivados da mesma curva de resposta impulsiva, foram aplicados os procedimentos do método da resposta impulsiva recomendado pela ISO 3382-2 (ISO, 2008). Foram empregados os seguintes itens:

- a) *software* DIRAC 5.0 (B&K 7841), instalado em notebook Sony VAIO;
- b) placa de aquisição de áudio Audio Interface ZE-0948;

- c) amplificador Lab. Gruppen LAB 300;
- d) analisador de nível de pressão sonora B&K 2260;
- e) fonte sonora dodecaédrica omnidirecional B&K 4296.

A FIGURA 15 mostra, esquematicamente, o arranjo destas conexões.

FIGURA 15 – CONFIGURAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO PARA A MEDIÇÃO DE T30



FONTE: O autor (2019).

Já a montagem experimental se deu da seguinte forma:

- a) no notebook Sony VAIO, foi conectada à sua saída USB 2.0 a entrada da placa de aquisição Audio Interface ZE-0948;
- b) a placa de aquisição, em sua linha de entrada esquerda (Line in L), foi também conectada ao analisador B&K 2260, por um cabo P10;
- c) a placa de aquisição em sua saída de potência esquerda (Power - Out 1 L), foi ainda conectada com a entrada do canal A do amplificador (input Ch A), por um cabo P10;
- d) a saída do canal A (output Ch A) do amplificador foi conectada à fonte sonora dodecaédrica por meio de um cabo NL4FC.

Para realizar as medições, configurou-se o software DIRAC 5.0 para medir o tempo de reverberação (T30), escolhendo-se a varredura senoidal, sinal *e-sweep*, como sinal de excitação. A duração deste sinal dimensionada para ser 1,5 maior que o valor do tempo de reverberação estimado por meio de uma prévia medição com o tempo de excitação superior a 4 s.

Findo o procedimento para as medições, posicionou-se a fonte sonora dodecaédrica a uma altura de 1,5 m do chão e a uma distância superior a 1,2 m das paredes, tal como considerado para a posição do receptor. Foram realizadas medições em, no mínimo, 4 posições para o receptor (analisador B&K 2260). Com o DIRAC 5.0, calculou-se o TR, o T30, o EDT, o C50, o D50 e o Ts, seguindo a ISO 3382-1 (ISO, 2009).

4.2 MODELAGEM ACÚSTICA DAS SALAS

A modelagem das salas em que houve as medições foi realizada no *software* B&K ODEON na versão 11. O ODEON é notadamente um dos mais consolidados na área de simulações acústicas, e este aplica o método *Ray Trace*, que consiste em modelar a propagação de ondas sonoras como se estas fossem raios ou feixes retilíneos, que podem sofrer reflexão, absorção e difração.

O processo de modelagem consistiu nas seguintes etapas:

- a) realizou-se a modelagem das salas no *software SketchUp Make*, versão 2017, o *SketchUp* é um *software* do tipo CAD (*Computer Aided Design*);
- b) criaram-se camadas//layers de desenho na modelagem do *SketchUp* para representar os materiais presentes em cada sala de aula;
- c) exportou-se cada modelo de sala de aula através do plug-in (SU2Odeon) com a extensão do arquivo (<nome_arquivo>.par);
- d) efetuou-se a importação de cada modelo da sala do *SketchUp* (<nome_arquivo>.par) para o ODEON;
- e) com modelo da sala já presente no ODEON, designou-se para cada camada criada previamente no *SketchUp* um material, sendo que cada material foi relacionado no “*material list*”, colocando o coeficiente de absorção nas bandas de oitava de 63 Hz até 8 kHz (madeira, concreto, piso, revestimento em geral).

Segundo a documentação do ODEON (CHRISTENSEN, 2013), o procedimento de simulações dos descritores acústicos deve ser feito conforme as normas para as medições reais. Os procedimentos podem ser consultados na seção 4.1 e seção 4.2. O ODEON possui um sistema que permite configurar a faixa de variação dos descritores acústicos, conforme mostra a FIGURA 16. As imagens das

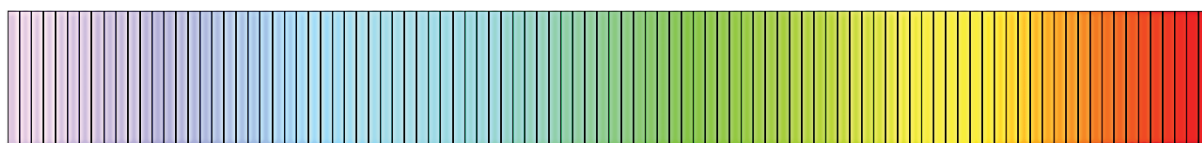
salas medidas podem ser consultadas no APÊNDICE 1, ao passo que os coeficientes de absorção considerados podem ser encontrados no APÊNDICE 2.

FIGURA 16 – VARIAÇÃO DOS DESCRITORES PARA A ESCALA NO ODEON versão 11.

VARIAÇÃO	U50	STI	D50	EDT	TR30	Ts	Leq
Mínimo	-13,8 dB	0	0	0 s	0 s	0	20 dB
Máximo	10,8 dB	1	1	1 s	2s	1 s	70 dB
Multibanda 63 Hz – 8 kHz	SIM	NÃO	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM

Bandas de oitava de 63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz e 8 kHz.

Escala COOL.dr, com 100 cores e transição suave.



Fonte: O autor (2019).

O sistema de coordenadas de alocação dos pontos foi estabelecido da seguinte forma: o eixo “x” aponta na direção da audiência, o eixo “y” aponta para a direita da audiência, e o eixo “z” aponta para cima. A coordenada da origem ($x = 0$; $y = 0$; $z = 0$) foi posicionada na extremidade inferior esquerda da audiência, atrás do professor, no caso de salas de aula, conforme mostra o APÊNDICE 3.

Com isto, segundo a ISO 3382-2 (ISO, 2008), para medir o T30 deve-se ter uma fonte com a diretividade e o nível de potência sonora omnidirecional. Para tanto, a fonte selecionada na biblioteca interna do ODEON foi a (Omni.SO8). Para as medições de STI, a fonte selecionada foi a (BB93_NORMAL_NATURAL.SO8), com a equalização para obter nível de 60 dB para as bandas de oitava de 63 Hz até 8 kHz.

Com a modelagem concluída, realizaram-se os seguintes passos na interface de usuário do ODEON, para realizar as simulações:

- selecionou-se, no “*Room Setup*”, a duração da resposta impulsiva e adicionou-se o ruído de fundo medido;
- no “*Source-Receiver List Job*”, foram definidas as posições das fontes. A fonte sonora omnidirecional (Omni.SO8) foi empregada para medição de T30, EDT, C50, D50 e Ts. Para medição de STI e o U50, criou-se outro *JOB*, com a fonte sonora (BB93_NORMAL_NATURAL.SO8), e foram equalizados os ganhos

para obter um Leq de 60 dB a uma distância de 1 metro para cada banda de oitava.

c) no “*Define Grid*”, foram criadas as posições dos receptores, ou seja, os microfones virtuais. Eles foram posicionados ao longo de uma malha, ou *grid*, com espaçamento uniforme, a uma altura de 1,20 m do chão.

d) no “*Joblist*”, executaram-se as simulações dos descritores acústicos.

Este procedimento foi repetido para cada sala de aula. A validação dos modelos simulados foi realizada comparando-se o erro relativo entre o valor médio medido experimentalmente e o valor médio simulado pelo ODEON.

4.3 PLANEJAMENTO FATORIAL DE EXPERIMENTOS

Montgomery (2013) apresenta o Planejamento Fatorial de Experimentos, ou *Design of Experiments* (DOE), como o ato planejar/projetar a execução de um experimento ou réplicas deste, com o objetivo determinar como a variação de determinados fatores ou variáveis controláveis (entradas), impacta sobre as variáveis de resposta do sistema (saídas). Para tanto, um modelo funcional multilinear pode ser estimado, expressando todas as relações entre os fatores controláveis, x_{ij} , e as respostas, y_i . A Eq. (28) mostra a construção desse modelo, qual seja,

$$\begin{aligned} y_i &= \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \cdots + \beta_j x_{ij} + \epsilon_i \\ &= \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij} + \epsilon_i, i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (28)$$

em que os coeficientes β_j são os regressores. É por meio destes que se calcula a significância associada com as variáveis de entrada x_{ij} .

A Eq. (28) tem na sua forma matricial dada como $Y = X\beta + \epsilon$, em que y é a resposta e X é a matriz de entrada. Muitas vezes, no contexto de aplicação do DOE, a matriz X denominada de matriz contraste. O regressor β_0 corresponde ao efeito da média (M), ou seja, o efeito do intercepto do modelo linear, e ϵ é o erro de estimativa associado ao experimento.

Neste trabalho, foi aplicado um Planejamento Fatorial com dois níveis para cada fator controlável de entrada, sendo o nível mínimo (-1) e máximo (+1). Portanto, o planejamento aplicado foi do tipo 2^k , com $k = 4$. O número k no expoente informa a quantidade de fatores controláveis avaliados e a base informa os níveis, neste caso, 2. Os fatores selecionados foram: ruído de fundo, representado por um valor da curva NC, o coeficiente de absorção sonora do teto da sala, o confinamento, que informa se as portas e janelas estão abertas ou fechadas, e, por fim, a ocupação, indicando se a sala contém ou não audiência. A TABELA 8 mostra os fatores.

TABELA 8 – NÍVEIS DO PLANEJAMENTO FATORIAL.

NÍVEL	FATORES NATURAIS			
Categoria	NC	Absorção Teto	Confinamento	Audiência
Valor mínimo	15	0,10	Aberto	Presente
Valor máximo	40	0,90	Fechado	Ausente
	FATORES CODIFICADOS			
	A / x_1	B / x_2	C / x_3	D / x_4
Valor mínimo	-1	-1	-1	-1
Valor máximo	+1	+1	+1	+1

FONTE: O autor (2019).

Com a configuração dos níveis, criou-se a matriz contraste, que contém todas as possíveis combinações entre os fatores controláveis. Para o planejamento 2^4 , são 16 combinações. Cada combinação é denominada de rodada (*run*) e representa uma linha no QUADRO 4. A matriz de contraste é dividida em efeitos principais, 1ª ordem, e, efeitos cruzados, 2ª, 3ª e 4ª ordens. Estes efeitos de interação são os efeitos provenientes das combinações dos efeitos principais. Conforme mostra o QUADRO 4.

QUADRO 4 – MATRIZ CONTRASTE COM A ORDEM DOS EFEITOS NO PLANEJAMENTO 2^K.

	Matriz contraste (Matriz de entradas) - Ordem dos efeitos															Matriz de respostas
	1 ^a				2 ^a						3 ^a				4 ^a	--
Run	A	B	C	D	AB	AC	AD	BC	BD	CD	ABC	ABD	ACD	BCD	ABCD	Y _{i,K} *
1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	y _{1,K}
2	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	y _{2,K}
3	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	y _{3,K}
4	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	y _{4,K}
5	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	y _{5,K}
6	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	y _{6,K}
7	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	y _{7,K}
8	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	y _{8,K}
9	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	y _{9,K}
10	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	y _{10,K}
11	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	y _{11,K}
12	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	y _{12,K}
13	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	y _{13,K}
14	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	y _{14,K}
15	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	y _{15,K}
16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	y _{16,K}

* A matriz de respostas simuladas no ODEON versão 11, corresponde às respostas EDT, T30, Ts, D50, U50 e STI para as bandas de oitava e STI, STI masculino e STI feminino em banda única.

FONTE: Adaptado de MONTGOMERY (2013, p. 257).

A matriz de respostas Y_{i,K} no QUADRO 4, em que i = 1 até 16 informa a rodada (run) do experimento, enquanto, que o índice K, neste caso, varia de 1 até 6, está relacionado com a indexação dos descritores acústicos em estudo, conforme mostra a TABELA 9, enquanto que K.

TABELA 9 – INDEXADORES (K) DA MATRIZ DE RESPOSTAS

DESCRIPTOR	EDT	T30	Ts	D50	U50	STI
K	1	2	3	4	5	6

FONTE: O autor (2019).

Dessa forma, como exposto na TABELA 8, para simular a ocupação de cada sala com a presença de audiência, ou seja, o efeito D, foram selecionados dados de absorção apresentados por Harris (1994). Eles foram sintetizados na biblioteca do ODEON, versão 11, conforme o QUADRO 5.

QUADRO 5 – COEFICIENTES DE ABSORÇÃO SONORA DAS OCUPAÇÕES NAS SALAS

AUDIÊNCIA EM:	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
Cadeiras de madeira 1 pessoa / metro	0,16	0,16	0,24	0,56	0,69	0,81	0,78	0,78
Cadeiras de madeira 2 pessoas / metro	0,24	0,24	0,40	0,78	0,98	0,96	0,87	0,87
Poltronas altamente acolchoadas	0,72	0,72	0,80	0,86	0,89	0,90	0,90	0,90
Poltronas mediantemente acolchoadas	0,62	0,62	0,72	0,80	0,83	0,84	0,85	0,85
Poltronas levemente acolchoadas	0,51	0,51	0,64	0,75	0,80	0,82	0,83	0,83

FONTE: O autor (2019).

Matematicamente, a ponderação dos efeitos que uma determinada variável de entrada tem sobre a saída é obtida realizando-se um ajuste multilinear, pelo método dos mínimos quadrados, ou seja, aplica-se a Regressão Linear Múltipla (RLM). Tal ajuste pondera os regressores β mostrados na Eq. (28) com uma solução ótima, determinada pela minimização do erro residual, $\epsilon_i = y_i - \hat{y}_i$, ou seja, o valor experimental/simulado subtraído do valor obtido pelo ajuste, para estimar o melhor conjunto de valores $\hat{\beta}$. A Eq. (29) mostra a expressão usada no ajuste pelo Método dos Mínimos Quadrados, em que se busca obter o valor mínimo de,

$$L = \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n \left(y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij} \right)^2 \quad (29)$$

onde L é a norma euclidiana.

O valor da solução ótima para os regressores, do decorrente problema da Eq. (29), admite solução ótima na forma $\hat{\beta} = (X'X)^{-1}X'Y$, em que X é a matriz contraste, X' é a matriz transposta de X e $(\cdot)^{-1}$ é o operador de inversão da matriz. Os valores dos efeitos (significâncias) das variáveis de entrada sobre a saída é dobro do valor dos regressores $\hat{\beta}$. Este fato se deve à particularidade de obter o valor médio das respostas variando-se entre -1 e +1 (MONTGOMERY, 2013).

O QUADRO 6, mostra a organização da correspondência dos fatores avaliados. Além disso, a ordem de realização das rodadas foi configurada para ser aleatória, conforme mostra o QUADRO 6.

QUADRO 6 – MATRIZ CONTRASTE X (ENTRADA) NA REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA

	M*	A	B	AB	C	AC	BC	ABC	D	AD	BD	ABD	CD	ACD	BCD	ABCD
β_0	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1
β_1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1
β_2	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1
β_3	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1
β_4	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1
β_5	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1
β_6	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1
β_7	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
β_8	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1
β_9	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
β_{10}	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1
β_{11}	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1
β_{12}	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
β_{13}	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
β_{14}	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1
β_{15}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

* M corresponde ao intercepto.

FONTE: Adaptado de MONTGOMERY (2013, p. 452).

Um exemplo para a equação de um modelo cuja variável de resposta seja o STI é dada pela Eq. (30), a qual foi desenvolvida mediante expansão da Eq. (28),

$$STI(A, B, C, D) = \beta_0 + A\beta_1 + B\beta_2 + AB\beta_3 + C\beta_4 + AC\beta_5 + BC\beta_6 + ABC\beta_7 + \dots \quad (30)$$

$$+ D\beta_8 + AD\beta_9 + BD\beta_{10} + ABD\beta_{11} + CD\beta_{12} + ACD\beta_{13} + BCD\beta_{14} + ABCD\beta_{15}$$

O erro na estimativa dos efeitos é obtido através dos efeitos de interações de ordens superiores. Como, o planejamento aplicado neste trabalho não possuiu réplicas e segundo Montgomery (2013, p. 271) para estes casos, pode-se criar um gráfico de distribuição linear dos efeitos, conforme a Eq. (31), para estimar os erros para os efeitos,

$$f(x)dx = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (31)$$

em que μ é a média e σ é o desvio padrão.

Logo, na determinação dos erros dos efeitos, considera-se o quadrado do valor dos efeitos, ou seja, β_j , $j = 1$ até 16, como a variância dos efeitos ponderada pelo número de amostras, que no caso $n = 16$. Portanto, o erro dos efeitos é dado por

$$V(efeito_j) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{16} (2 \cdot \beta_j)^2 \quad (32)$$

na Eq. (32), considerou-se cada conjunto de β_j para cada ajuste da variável na saída, sendo que n é o número de regressores, conforme o QUADRO 6. O efeito é considerado como $efeito_j = 2 \cdot \beta_j$. Logo a estimativa do erro para cada valor do β_j é $\epsilon_i = \sqrt{V(efeito)}$.

Os experimentos e as rodadas neste trabalho devem ser compreendidos com a modificação dos fatores controláveis nos modelos criados para cada sala, no software ODEON, versão 11. As respostas foram o T30, EDT, D50, Ts, U50 para as multibandas de 63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz e 8 kHz e o STI, com apenas um valor para todas estas bandas. O C50 não foi avaliado pois, este está analiticamente relacionado com o D50 (ISO, 2008), com isto tornando as análises mais parcimoniosas e evita a redundância de avaliar o C50 e D50 ao mesmo tempo.

4.4 ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS

Uma vez que na seção 4.3 foram apresentadas as tabelas que representam as matrizes com as entradas e as respectivas saídas do experimento fatorial, revela-se, nesta seção, como é investigada a existência de correlações significativas entre os descritores. Estas correlações podem configurar nos seguintes dois tipos: (i) intracorrelações entre as respostas para um mesmo parâmetro, conforme as bandas de oitava de 63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz e 8 kHz e (ii) intercorrelações entre os descritores T30, Ts, EDT, D50, U50 e STI. Portanto, para quantificar estas correlações e estabelecer de que forma ocorre a variação dos

descritores em conjunto, aplicou-se o Método de Análise dos Componentes Principais (ACP), ou *Principal Component Analysis* (PCA), em inglês.

A ACP é, portanto, uma técnica de mapeamento multivariada, que visa a redução dimensional sem a perda significativa de informação. Segundo Abdi e Williams (2010), a ACP tem os seguintes objetivos principais:

- a) extrair as informações mais importantes de dados tabelados;
- b) comprimir o tamanho do conjunto de dados, mantendo apenas estas informações mais importantes;
- c) simplificar a descrição do conjunto de dados;
- d) analisar a estrutura dos experimentos e das variáveis.

A abordagem da ACP baseia-se na fatoração de uma matriz de ordem superior em componentes ortogonais, para a determinação de uma matriz de ordem menor. Jackson (1991) e Jolliffe (2011) apresentam a obtenção da ACP como a extensão de uma propriedade da álgebra linear matricial: se uma matriz $S_{p \times p}$ é simétrica e não singular, ela pode ser condensada (reduzida) para uma forma diagonal L , pela pré e pós-multiplicação de S por uma matriz ortonormal U específica. Uma matriz ortonormal possui a seguinte propriedade: $U^T U = I$, em que I é matriz identidade.

Consequentemente, a diagonalização de S é $U^T S U = L$. As entradas da diagonal de L são denominadas de raízes características, ou autovalores, de S , ao passo que os vetores coluna de U são chamados de vetores característicos, ou autovetores, de S .

Para a obtenção dos autovalores de S soluciona-se a equação característica, $|S - \lambda I| = 0$, em que I é a matriz identidade, que se trata de uma equação polinomial de ordem p , cujas raízes são os autovalores λ . Os autovetores t_i são obtidos, então, solucionando-se $[S - \lambda I]t_i = 0$. Para a aquisição dos vetores coluna ortonormais (também autovetores) de U , procede-se da seguinte forma:

$$u_i = \frac{t_i}{\sqrt{t_i^T t_i}} \quad (33)$$

Portanto, por extensão, a ACP fica definida pelo mapeamento dos componentes principais de uma matriz X genérica, cujas colunas são inicialmente

correlacionadas, para os componentes de uma matriz Z , cujas colunas são ortonormais e não correlatas. Para realizar o mapeamento de X em Z , usa-se a matriz S , como esta matriz S , pode-se aplicar a matriz de covariância-variância amostral ou a matriz de correlação amostral. Para retirar o efeito da média sobre a matriz Z , calcula-se as novas coordenadas com componentes principais como $z = U^T[x - \bar{x}]$, da qual para determinar as coordenadas de um elemento i sobre os eixos principais fica definida como $z_i = u_i^T[x - \bar{x}]$.

Neste trabalho, a matriz S foi a matriz de correlação. Os dados tabulados foram escalonados e padronizados, aplicando a Eq. (34), para retirar o efeito da média e normalizar as entradas pelos valores dos desvios padrões de cada amostra, maximizando, com isto, a variância dos dados,

$$xnorm_{ni} = \frac{x_{ni} - \bar{x}_n}{\sigma_{xn}} \quad (34)$$

em que $xnorm_{ni}$ é o resultado da normalização e padronização, x_{ni} é o valor do elemento i do vetor de entrada n , \bar{x}_n é o valor médio de todos os elementos i do vetor de entrada n , e σ_{xn} é o desvio padrão de todos os elementos i do vetor de entrada n . A matriz de correlação amostral (R) para X fica definida como

$$R = \begin{bmatrix} 1 & r_{12} & r_{13} & \cdots & r_{1p} \\ r_{12} & 1 & r_{23} & \cdots & r_{2p} \\ r_{13} & s_1^2 & 1 & \cdots & r_{2p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{p1} & r_{p2} & r_{p3} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (35)$$

em que

$$r_{jk} = \frac{s_{jk}}{s_j s_k} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)(x_{ik} - \bar{x}_k)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{ik} - \bar{x}_k)^2}} \quad (36)$$

sendo r_{jk} a correlação da entrada da linha j com a entrada da coluna k , e s_{jk} a covariância conjunta desta mesma entrada.

As saídas gráficas foram realizadas pelo gráfico do tipo Pareto. Ele estratifica o percentual de explicação cumulativa da variância conforme os componentes

principais l_k . Segundo Jolliffe (2011), quando se usa a matriz de correlação, tem-se que,

$$t_m = \frac{100}{p} \sum_{k=1}^m l_k \quad (37)$$

em que t_m é a explicação cumulativa da variância com base no autovalor l_k , p é a dimensão em linhas da matriz original dos dados e m é a quantidade de autovalores. Jolliffe (2011) recomenda um valor de corte de t_m entre 70% e 90%.

Determinou-se qual componente principal estava mais correlacionado com os dados não transformados, ou seja, nos dados originais. Dessa forma, pode-se investigar qual é o significado físico dos componentes principais, de tal modo, gerar interpretações contextualizadas sobre cada componente. Segundo Jackson (1991) para este tipo de procedimento, determina-se de forma diagnóstica a correlação, r_{zx} , para cada componente principal. A Eq. (38) mostra o procedimento neste tipo de avaliação, considerando

$$r_{zx} = \frac{u_{ij}\sqrt{l_i}}{s_j} \quad (38)$$

em que r_{zx} é a correlação entre com os dados não transformados (x) com os componentes principais da matriz (z), s_j é a variância da j -ésima variável, l_i é o componente principal e u_{ij} é a entrada do autovetor associada ao componente principal j transformado.

Neste trabalho, os componentes principais foram calculados computacionalmente aplicando o software MATLAB®, versão 2016a. Para avaliar a casualidade nas correlações dada pela ACP, aplicou-se os testes H e T. Para visualizar a aplicação da ACP sobre os descritores T30, Ts, EDT, D50, U50 e STI, plotou-se os dois componentes principais. Este tipo de gráfico é conhecido como *biplot*.

4.5 REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

Por meio de uma inspiração neurofisiológica do comportamento conexionista dos neurônios biológicos, e visando resolução de problemas, com aprendizagem e generalização, os pesquisadores McCulloch e Pitts (1943) propuseram um modelo matemático de neurônio artificial. Este modelo, embora simples, formou a base para o desenvolvimento de Redes Neurais Artificiais (RNAs) mais robustas, com algoritmos sofisticados já implementados nos tempos atuais.

Com este desenvolvimento, as RNAs, ou, em inglês *Artificial Neural Networks* (ANNs), constituem-se em um vasto grupo de métodos consolidados para o processamento de dados, que em conjunto com a estatística, cunhou-se o termo de genérico de *Machine Learning* ou Aprendizagem de Máquinas. Desse modo, existem aplicações das RNAs em campos que envolvam classificação, regressão, aproximação, agrupamento, predição e outros.

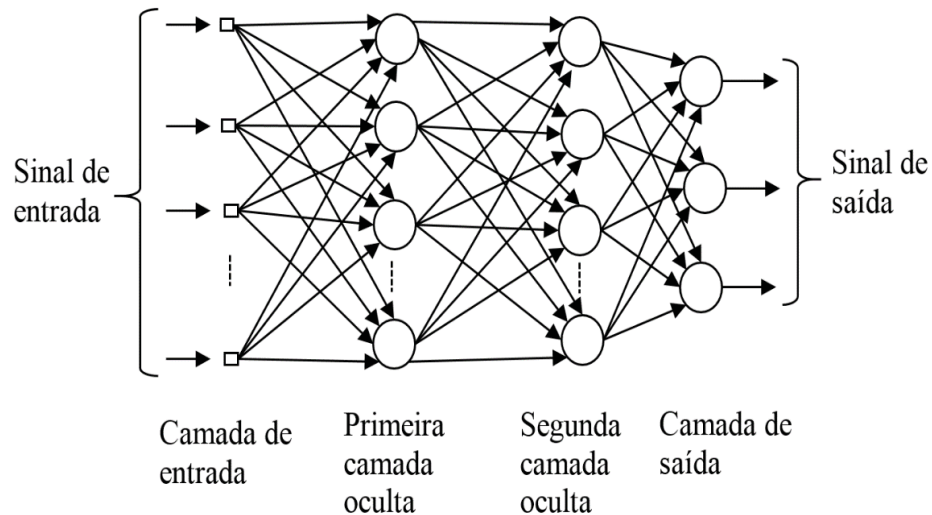
O objetivo fundamental das redes neurais é produzir generalização através de um processo de treinamento. O termo generalização, neste contexto, refere-se ao ato de gerar estimativas para dados que não foram utilizados no conjunto de treinamento. O treinamento é etapa na qual se ajusta os pesos das conexões entre os neurônios por meio de um algoritmo de treinamento a fim de obter a generalização. Haykin (2009) e Russell e Norvig (2016) apresentam mais detalhes sobre as epistemologias e heurísticas das redes neurais.

Neste trabalho, aplicaram-se as RNAs como aproximadores universais, objetivando gerar o mapeamento entre as entradas e as saídas. Como entradas foram consideradas a matriz contraste, ver QUADRO 6 e como saídas usou as respostas simuladas dos descritores T30, Ts, EDT, D50, U50 e STI. Para tanto, foi implementada a arquitetura de Perceptron Multicamadas, que, em inglês é mais conhecida como *Multilayer Perceptron* (MLP). A arquitetura de uma rede releva como os neurônios artificiais estão organizados estruturalmente e como os sinais fluem entre estes. Por outro lado, o termo topologia de uma rede, diz respeito à quantidade de neurônios nestas camadas organizadas estruturalmente de determinada forma. Por meio da FIGURA 17, mostra-se o exemplo da topologia MLP.

Com base na FIGURA 17, mostram-se os principais elementos de uma rede do tipo MLP, junto à configuração utilizada neste trabalho para aproximação de dados no tipo de mapeamento entre entrada e saída. Observa-se a camada de entrada ou

camada de neurônios sensoriais, as camadas ocultas, que no caso são duas (1ª camada oculta e 2ª camada oculta) e a camada de saída.

FIGURA 17 – MODELO DE UMA REDE PERCEPTRON MULTICAMADAS



FONTE: Adaptado de HAYKIN (2009, p. 435).

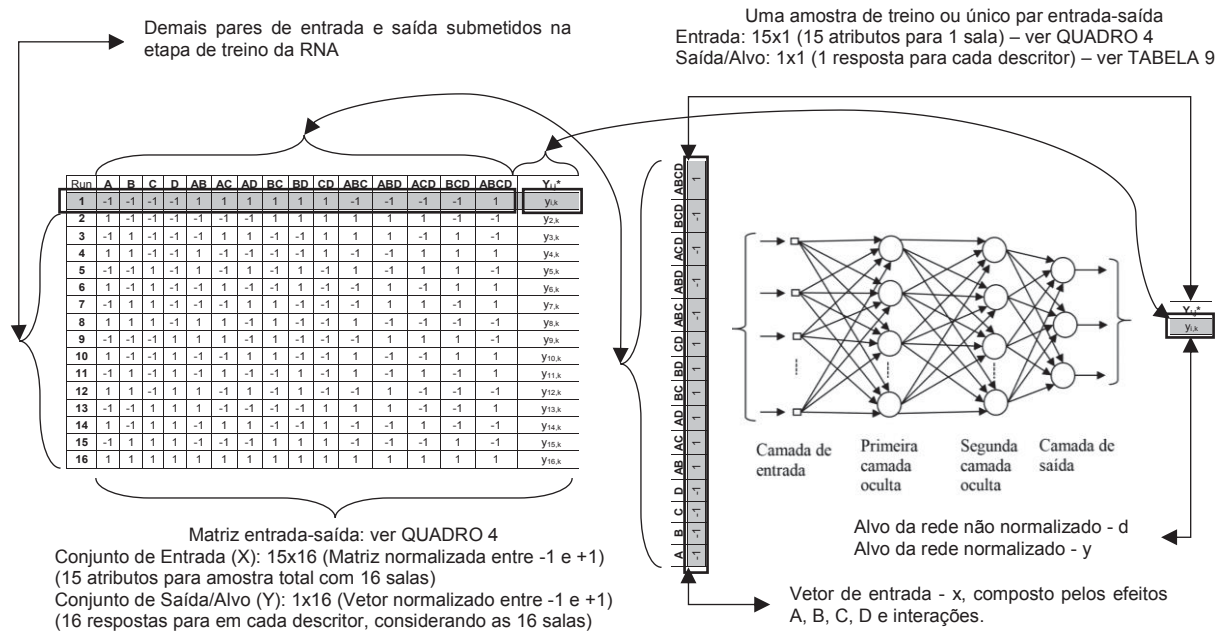
Os elementos conectores entre os neurônios de diferentes camadas são representados pelos pesos sinápticos, onde está incluso o termo de viés, ou *bias*.

4.5.1 Características da rede empregada

Para a etapa de treinamento, o sinal de entrada é composto de um vetor amostral x , com 15 atributos, que são os fatores A, B, C, D e suas respectivas interações de 2ª, 3ª e 4ª ordens. Além disso, do planejamento fatorial foram geradas 16 salas representadas pelas linhas (*runs*) no QUADRO 4. A saída desejada ou alvo do treinamento da rede é o escalar d , quando este é normalizado bipolarmente, representa-o por y .

Deste modo, com as 16 salas e consequentemente 16 saídas para cada um dos descritores multibandas T30, EDT, C50, D50, Ts além do STI, estas bandas de oitava foram reduzidas para um valor aplicando a ACP. Consequentemente, a FIGURA 18 mostra esquematicamente a atribuição de entrada e saídas na RNA aplicados durante o treinamento.

FIGURA 18 – ESQUEMA DE ATRIBUIÇÃO DA RELAÇÃO ENTRADA/SAÍDA NO TREINO DA REDE



FONTE: O autor (2019).

O algoritmo de treinamento utilizado para o ajuste dos pesos sinápticos foi o algoritmo de Retropropagação de Erros, ou *Error Backpropagation*. Este foi originalmente baseado no método de otimização do Gradiente Descendente Estocástico. No entanto, para aumentar a velocidade de treinamento, aplicou-se o algoritmo de Retropropagação de Erros, otimizado pelo algoritmo de Levenberg-Marquardt (HAYKIN, 2009).

Ainda na etapa de treinamento, os pares de entrada e saída foram normalizados bipolarmente entre -1 e +1, aplicando a Eq. 36. Essa normalização é recomendada pois acelera o treinamento e retira a influência de amplitudes. Nota-se que o vetor de entrada, x , já está em forma bipolar, devido, a montagem da matriz de entrada no planejamento fatorial, ver QUADRO 6. Portanto, existe somente a necessidade de mapear as saídas/alvo (d) da rede, para os valores normalizados y . Tem-se, então que

$$y = (y_{max} - y_{min}) \cdot \frac{(d - d_{min})}{(d_{max} - d_{min})} + y_{max} \quad (39)$$

em que y é o valor corresponde a d ponderado entre -1 e +1. O vetor a ser ponderado é representado por d , os valores máximo e mínimo de d são d_{max} e d_{min} respectivamente, e $y_{max} = 1$ e $y_{min} = -1$.

Após o treino da RNA, adentra-se na etapa de operação da rede, quando os pesos sinápticos já foram ajustados. Desse modo, a operação de uma rede, consiste em aplicar os valores de entrada (x) da rede e calcular saída estimada pela rede (s) e verificar sua correção e o erro médio quadrático em relação ao alvo da rede (d).

Com isto, calcula-se a qualidade do desempenho do treinamento das RNAs que foi avaliada pela correlação R^2 de Pearson. O cálculo do R , no contexto das RNAs, é dado por

$$R = \frac{\sum_j^N (d_j - \bar{d})(s_j - \bar{s})}{(N - 1)s_d s_y} \quad (40)$$

Os termos da Eq. (40) são dados por

$$s_d = \sqrt{\frac{1}{N - 1} \sum_{j=1}^N (d_j - \bar{d})^2} ; s_s = \sqrt{\frac{1}{N - 1} \sum_{j=1}^N (s_j - \bar{s})^2} \quad (41)$$

em que $N = 16$ é o número de amostras dos pares de entrada e saída, \bar{d} é o valor do alvo de treinamento, correspondente aos elementos d_j , ou seja, os elementos da última coluna da matriz mostrada no QUADRO 4, já os valores estimados como saída da rede neural são representados por s_j cuja a média é \bar{s} , s_j e s_j são respectivamente o desvio padrão dos alvos (d_j) e da saída estimada pela rede neural (s_j).

A métrica de atualização do erro de estimativa, na camada de saída da rede neural com apenas um neurônio, foi o Erro Quadrático Médio (EQM), calculado como,

$$\text{EQM} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N e_j^2(n) \quad (42)$$

em que $e_j(n) = d_j(n) - s_j(n)$, sendo $N = 16$ o número de amostras dos pares de entrada e saída. A FIGURA 19, ilustra este procedimento.

FIGURA 19 – ESQUEMA DE ATRIBUIÇÃO DA RELAÇÃO ENTRADA/SAÍDA NO TREINO DA REDE

```
% PSEUDOPROGRAMA DE TREINO, OPERAÇÃO E CÁLCULO DE DESEMPENHO DE UM REDE NEURAL
% Declaração das variáveis
X    <- matriz de entrada, dimensão: 15x16 (15 atributos e 16 salas) - QUADRO 4
d    <- vetor alvo, dimensão: 1x16 (Para um descritor 16 respostas) - TABELA 9
Y    <- vetor alvo normalizado entre -1 e +1, dimensão: (1x16) - Eq. 39
s    <- saída estimada pela rede neural, dimensão: (1x16)
rede <- estrutura que representa o funcional da rede neural

% Cria o tipo de rede e a dimensiona. Os pesos sinápticos inicializados em zero.
rede <- MLP([Camadas ocultas e números de neurônios nelas], algoritmo de treino)
rede = feedforwardnet([5 5], trainlm); % Comando no MATLAB®.

% Treina a rede pelo ajuste nos pesos sinápticos.
rede = train(rede,X,Y); % Comando no MATLAB®.

% Pós-treinamento, com os pesos ajustados e fixos, faz-se a operação.
s = rede(X); % Comando no MATLAB®.

% Cálculo do desempenho da rede neural após o treino.
[EQM, R²] = perform(rede,s,d) % Comando no MATLAB®.
```

FONTE: O autor (2019).

Nas RNAs, pode ocorrer o fenômeno de sobreajuste (*overfitting*), que é quando a RNA “decora”, ou aproxima fielmente, os dados de treinamento. O sobreajuste tem como consequência negativa a perda da capacidade de generalizar da RNA. Portanto, com o objetivo de reduzir a ocorrência de sobreajuste, foram aplicadas duas abordagens simultâneas:

(i) Dividiu-se o conjunto de treinamento nos grupos de treino, validação e teste na proporção de 80%, 20% e 20%, respectivamente. Avaliou-se a evolução dos erros nestes grupos durante as épocas aplicando o Método *K-fold*, implementado no *toolbox nntool* do software MATLAB®, com o objetivo de garantir a generalização;

(ii) Treinou-se 6 diferentes topologias, variando nestas a quantidade de neurônios nas camadas ocultas, conforme mostra o QUADRO 7. Este procedimento foi adotado segundo as recomendações realizadas por Piotrowski e Napiorkowski (2013).

Consequentemente, a saída (estimativa) da rede neural foi então considerada como a média das 6 topologias previamente treinadas, conforme mostra o QUADRO 7.

QUADRO 7 – CONFIGURAÇÕES DOS PROJETOS DAS REDES NEURAIS

DESCRIPTOR	CONDIÇÕES
Arquitetura	Perceptron Multicamadas
Tipo de Treinamento	Supervisionado
Classe de Problema	Aproximação
Quantidade de Entradas	16
Quantidade de Saídas	1
Topologia 1	MLP 16-5-5-1
Topologia 2	MLP 16-10-10-1
Topologia 3	MLP 16-15-15-1
Topologia 4	MLP 16-20-20-1
Topologia 5	MLP 16-30-30-1
Topologia 6	MLP 16-35-35-1
Algoritmo de Treinamento	Retropropagação de Erros, otimizado por Levenberg-Marquardt
Funções de Ativação nas Camadas Ocultas	Função Tangente Hiperbólica
Função de Ativação na Camada de Saída	Função Linear (identidade)

FONTE: O autor (2019).

Os critérios de parada para o treinamento foram os seguintes: o EQM atingir $1e-12$, a quantidade de épocas atingir 500, o tempo máximo de 5 min para cada treinamento. Os demais critérios de parada foram baseados na configuração pré-programadas do *toolbox* “*nntool*” do MATLAB®, da rotina do algoritmo de treinamento de Levenberg-Marquardt (WILAMOWSKI; YU, 2010).

Para obter uma resposta otimizada dos 50 treinamentos independentes da rede neural, foi calculada uma rede neural equivalente média, $(RNAeq)_{médio}$, para cada topologia. Para a obtenção da $(RNAeq)_{médio}$, os seguintes passos foram realizados:

(i) para cada topologia mostrada na QUADRO 7, foram realizados 50 treinamentos independentes. A matriz de pesos sinápticos foi sempre reinicializada em zero a cada novo treinamento. O indicador de performance de treino EQM de cada treino foi armazenado como $EQM(i)$, com $i = 1$ até 50;

(ii) calculou-se a média simples do conjunto de 50 valores de EQM, correspondentes ao treino da etapa anterior, para cada uma das 6 topologias do QUADRO 7, sendo o valor médio calculado como $EQM_{médio} = (1/50) \sum_{i=1}^{50} EQM(i)$;

(iii) verificou-se se o $EQM(i)$ de cada uma das 50 redes treinadas foi maior que o valor $EQM_{médio}$. Se $EQM(i) < EQM_{médio}$, então adiciona-se essa rede $EQM(i)$ no novo grupo otimizado EQM_{opt} ;

(iv) calculou-se a média simples deste novo conjunto EQM_{opt} , gerando assim o $(RNAeq)_{médio}$.

Nessa seção, foram definidos a arquitetura, topologias, algoritmo de treinamento, critérios de parada do treino, técnicas para evitar sobreajuste e

abordagem para otimizar a generalização dos treinamentos. Todas estas implementações computacionais foram desenvolvidas por código fonte no ambiente MATLAB®, versão 2016a. Na próxima seção, será discutido como este dimensionamento das redes foi aplicado no problema de determinação das significâncias dos fatores do Planejamento Fatorial, mostrados na TABELA 8.

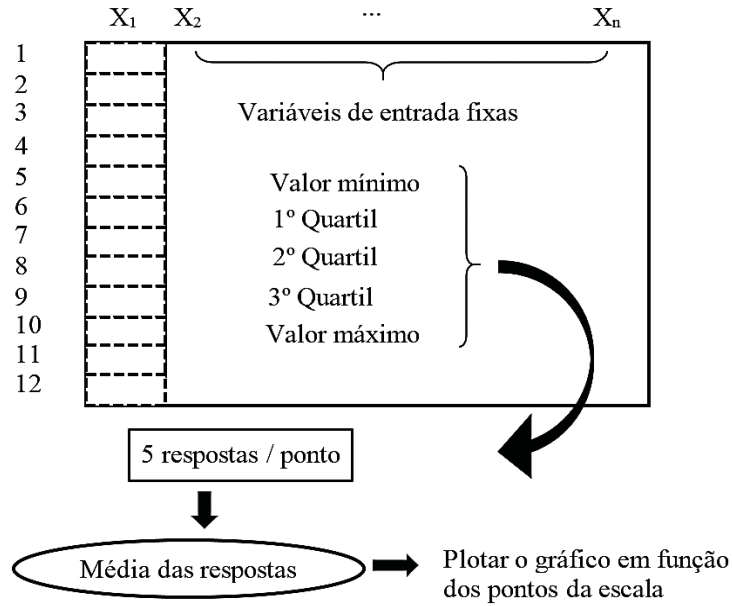
4.5.2 Método Profile Modificado - MPM

As RNAs possuem diversos métodos para avaliar a significância das variáveis de entrada sobre a saída do sistema (GEVREY; DIMOPOULOS; LEK, 2003). Estas análises avaliam a significância de uma variável de entrada ao mensurar o efeito que ela causa sobre as saídas da rede neural. Neste trabalho, foi aplicado o *Profile Method* (PM) (LEK et al., 1995) na sua versão modificada, denominada doravante de Método *Profile* Modificado (MPM). Esse método já foi aplicado com sucesso em Junior et al. (2018) e Do Nascimento e Oliveira (2016).

Originalmente, o PM calculava as curvas de *profile* para cada variável. As curvas de *profile* podem ser compreendidas como uma curva que no eixo das abcissas, contém a escala da variável, ou seja, a quantidade de pontos discretos ao qual se segmenta a variável de entrada em seu intervalo de variação, do mínimo ao seu máximo.

Dessa forma, a variável independente é calculada considerando a média de cinco pontos, aplicada na saída da rede neural já treinada. Estes são o valor mínimo, 1º, 2º, 3º quartis e o valor máximo. A curva resultante em função da escala é denominada de curva *profile* correspondente a cada variável de entrada, conforme mostra a FIGURA 20.

Portanto, o MPM calcula a significância de certa variável de entrada da RNA aplicando uma regressão linear sobre a curva de Profile otimizada. Além disso, como explicitado previamente, foram consideradas 6 topologias, treinadas independentemente 50 vezes, donde resultou uma rede neural média equivalente otimizada (RNAeq)_{médio}. Em contrapartida, o MP original calcula a significância somente com base no valor máximo da curva de Profile para cada variável de entrada.

FIGURA 20 – ESQUEMA DO MÉTODO *PROFILE* ORIGINAL

FONTE: Adaptado de GEVREY; DIMOPOULOS; LEK (2003).

Dessa forma, para fazer uma comparação gráfica na mesma escala entre os desempenhos na estimativa de significância dos fatores controláveis, normalizaram-se os resultados dos coeficientes de regressão da ANN e do DOE para o ANN-z e o DOE-z, respectivamente. Essa transformação normalizada dos dados na escala z pondera a diferença residual dos estimadores com base no desvio padrão, S , dos estimadores, conforme mostra a Eq. (43), em que

$$z = \frac{(x - \bar{x})}{S} \quad (43)$$

Para uma população aleatória o desvio padrão é

$$S = \sqrt{\frac{1}{P-1} \sum_{i=1}^P (x_i - \bar{x})^2} \quad (44)$$

em que $P = 15$ é o número de regressores, no caso, correspondentes aos efeitos A, B, C e D somados com os efeitos de interação de 2ª, 3ª e 4ª ordem, e x_i , com $i = 1$ até 15, corresponde às amostras dos fatores controláveis, conforme o disposto na

QUADRO 4. Todos os programas foram feitos no MATLAB® e são dispostos no APÊNDICE 4.

Na FIGURA 21, mostra-se a distribuição destas salas no *campus* Centro Politécnico da UFPR. Foram selecionadas salas com as características de auditórios com escalonamento de altura entre as fileiras de cadeiras.

5.2 RESULTADOS DAS MEDIÇÕES E SIMULAÇÕES DAS SALAS

Cada sala de aula possui um tipo construtivo diferente, portanto, a depender destas características construtivas, como quantidade de cadeiras e tipo de disposição das fileiras, a quantidade de pontos de medição e suas respectivas posições de medição variaram. Não foi realizado nenhum tipo de alteração nas salas para executar as medições. O objetivo de configurações dos posicionamentos das medições foi de buscar atingir o maior grau possível de fidedignidade com as condições reais das salas, quando professores e alunos estão presentes.

5.2.1 Medições do RF, NC, T30, EDT, C50, D50 e Ts

No QUADRO 8, mostra-se a distribuição do nível do ruído de fundo medido nas salas desocupadas, em função das frequências das bandas de oitava. O ruído de fundo foi medido durante 5 min de forma ininterrupta. Com isto, os níveis de pressão sonora sem ponderação nas bandas de oitava foram coletados. Por sua vez, o analisador B&K 2260 calculou nível equivalente ponderado em A, ou LAeq, em dB.

QUADRO 8 – VALORES DE RUÍDO DE FUNDO [dB] E CURVA NC.

SALA	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8kHz	NC	LAeq
ANF. 14 Bio.	52,6	48,3	38,6	32,2	32,0	29,9	23,0	19,5	35	38,2
AUD. 1 Eng. Qui.	44,9	34,5	30,0	23,2	21,4	21,1	19,6	17,0	23	29,3
PG 06 Eng. Mec.	50,1	48,0	41,0	40,2	38,9	30,0	25,3	24,9	30	42,5
ANF. 04 Bio.	50,8	48,9	42,6	34,6	28,9	25,1	21,9	21,4	32	38,7
ANF. 02 Bio.	58,0	50,4	44,9	36,6	31,9	29,3	22,8	18,0	34	41,3

FONTE: O autor (2019).

Do QUADRO 9 ao QUADRO 13, tem-se, respectivamente, os valores médios medidos considerando todos os pontos de medição em cada sala estudada, em função das bandas de frequência. Ressalta-se que os descritores, Tempo de Reverberação – TR [s], Tempo Central – Ts [ms], Definição - D50, Claridade - C50 [dB] e Tempo de Decaimento Inicial - EDT [s] foram calculados com base na resposta

impulsiva proveniente da fonte sonora dodecaédrica. Para a consolidação das estatísticas descritivas dos resultados, calculou-se o valor médio (M) e o desvio padrão amostral (s) dos descritores em suas respectivas bandas de oitavas. De posse destes, calculou-se o valor médio do descritor, sendo representado na última coluna dos respectivos quadros.

QUADRO 9 – VALORES MÉDIOS MEDIDOS DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO - TR [s]

SALA		Pontos	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8kHz	TR
ANF. 14 Bio.	M	5	1,13	0,97	0,77	0,60	0,50	0,47	0,46	0,39	0,66
	s		0,07	0,02	0,04	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01	0,03
AUD. 1 Eng. Qui.	M	4	1,54	0,74	0,63	0,45	0,37	0,45	0,46	0,46	0,64
	s		0,10	0,08	0,03	0,02	0,02	0,01	0,04	0,03	0,04
PG 06 Eng. Mec.	M	5	1,03	0,78	0,83	0,95	1,02	1,02	0,92	0,80	0,92
	s		0,31	0,09	0,04	0,07	0,02	0,01	0,01	0,01	0,07
ANF. 04 Bio.	M	5	3,19	2,56	2,07	1,57	1,07	1,07	1,03	0,85	1,68
	s		0,12	0,22	0,15	0,05	0,04	0,03	0,05	0,04	0,09
ANF. 02 Bio.	M	5	3,39	2,60	2,11	1,29	1,01	1,01	0,95	0,76	1,64
	s		0,59	0,15	0,07	0,04	0,02	0,02	0,02	0,03	0,11

FONTE: O autor (2019).

QUADRO 10 – VALORES MÉDIOS MEDIDOS DO TEMPO DE DEICAMENTO INICIAL – EDT [s]

SALA		Pontos	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8kHz	EDT [s]
ANF. 14 Bio.	M	5	1,05	0,78	0,61	0,52	0,48	0,50	0,45	0,38	0,60
	s		0,13	0,16	0,12	0,11	0,05	0,04	0,03	0,02	0,08
AUD. 1 Eng. Qui.	M	4	1,38	0,67	0,76	0,42	0,34	0,39	0,38	0,31	0,58
	s		0,21	0,09	0,12	0,11	0,05	0,09	0,08	0,11	0,11
PG 06 Eng. Mec.	M	5	0,62	0,75	0,83	0,89	1,03	1,02	0,93	0,80	0,86
	s		0,12	0,09	0,05	0,08	0,08	0,08	0,03	0,04	0,07
ANF. 04 Bio.	M	5	3,04	2,48	1,90	1,51	1,11	1,04	0,97	0,78	1,60
	s		0,44	0,21	0,04	0,06	0,06	0,06	0,04	0,05	0,12
ANF. 02 Bio.	M	5	3,44	2,80	1,76	1,16	0,95	0,93	0,93	0,72	1,58
	s		0,32	0,17	0,15	0,13	0,05	0,07	0,04	0,04	0,12

FONTE: O autor (2019).

QUADRO 11 – VALORES MÉDIOS MEDIDOS DA DEFINIÇÃO – D50.

SALA		Pontos	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8kHz	D50
ANF. 14 Bio.	M	5	0,54	0,60	0,67	0,79	0,79	0,79	0,81	0,87	0,73
	s		0,08	0,15	0,11	0,05	0,04	0,02	0,02	0,02	0,06
AUD. 1 Eng. Qui.	M	4	0,45	0,69	0,76	0,84	0,91	0,86	0,87	0,92	0,79
	s		0,12	0,06	0,06	0,07	0,02	0,06	0,07	0,04	0,06
PG 06 Eng. Mec.	M	5	0,63	0,54	0,58	0,54	0,48	0,49	0,50	0,59	0,54
	s		0,13	0,10	0,09	0,03	0,06	0,04	0,04	0,04	0,07
ANF. 04 Bio.	M	5	0,27	0,25	0,37	0,40	0,51	0,49	0,54	0,62	0,43
	s		0,08	0,08	0,05	0,03	0,03	0,06	0,06	0,08	0,06
ANF. 02 Bio.	M	5	0,38	0,28	0,35	0,48	0,51	0,52	0,54	0,67	0,47
	s		0,09	0,04	0,08	0,07	0,06	0,04	0,05	0,05	0,06

FONTE: O autor (2019).

QUADRO 12 – VALORES MÉDIOS MEDIDOS DA CLARIDADE – C50 [dB].

SALA		Pontos	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8kHz	C50
ANF. 14 Bio.	M	5	0,63	1,72	3,15	5,86	5,75	5,65	6,24	8,10	4,35
	s		-10,33	-7,57	-9,11	-12,41	-14,04	-17,82	-16,09	-17,24	-11,82
AUD. 1 Eng. Qui.	M	4	-0,83	3,47	5,07	7,20	10,05	7,79	8,07	10,32	5,66
	s		-8,59	-11,98	-11,97	-11,51	-17,20	-11,72	-11,55	-13,70	-11,81
PG 06 Eng. Mec	M	5	2,35	0,66	1,37	0,63	-0,35	-0,21	-0,03	1,62	0,74
	s		-8,24	-9,47	-9,95	-14,41	-12,25	-13,84	-14,21	-13,42	-11,45
ANF. 04 Bio.	M	5	-4,36	-4,82	-2,35	-1,76	0,21	-0,21	0,66	2,20	-1,21
	s		-10,65	-10,65	-12,42	-14,69	-14,82	-11,84	-11,77	-10,39	-11,90
ANF. 02 Bio.	M	5	-2,09	-4,19	-2,65	-0,42	0,17	0,35	0,73	3,04	-0,60
	s		-10,21	-14,00	-10,62	-11,18	-12,00	-14,10	-12,75	-12,98	-12,04

FONTE: O autor (2019).

QUADRO 13 – VALORES MÉDIOS MEDIDOS DO TEMPO CENTRAL – Ts [ms]

SALA		Pontos	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8kHz	Ts
ANF. 14 Bio.	M	5	75,12	62,20	48,90	33,18	32,12	31,90	29,90	22,30	41,95
	s		6,18	14,50	6,92	4,32	3,55	1,88	2,53	2,64	5,32
AUD. 1 Eng. Qui.	M	4	103,65	49,38	37,03	28,33	17,35	24,60	22,70	16,03	37,38
	s		16,96	3,92	5,46	7,07	3,56	9,10	8,44	6,57	7,63
PG 06 Eng. Mec	M	5	65,84	67,06	65,42	68,94	78,10	75,30	69,36	56,42	68,31
	s		12,99	6,82	10,12	4,41	6,09	5,44	4,41	4,97	6,91
ANF. 04 Bio.	M	5	219,14	177,32	138,80	110,60	75,38	75,78	67,86	51,26	114,52
	s		17,07	16,76	9,50	7,80	5,66	7,84	9,05	10,29	10,50
ANF. 02 Bio.	M	5	233,16	180,58	130,80	84,98	70,82	67,86	65,22	46,56	110,00
	s		37,41	10,06	18,02	10,42	6,92	3,81	4,69	6,56	12,24

FONTE: O autor (2019).

Vale ressaltar que os valores médios apresentados e o respectivo desvio padrão no QUADRO 12 são expressos na escala decibel, portanto, numa escala não linear, atentar então para as Eqs. (13) e (14) e a relação entre estas, Eq. (15).

Portanto, estes foram os resultados das medições experimentais. Na seção 5.2.2 são mostrados, de forma separada, os resultados das medições para o STI, uma vez que o STI possui algumas especificações diferentes dos descritores baseados somente na resposta impulsiva.

5.2.2 Medições do STI

Para as medições do STI, considerou-se apenas uma posição padrão de fala do professor em cada sala. Neste local, foi posicionada a boca artificial B&K 4227 e, para representar os alunos, posicionou-se o analisador B&K 2260 em diferentes pontos. No APÊNDICE 3, como já informado, tem-se os valores das coordenadas das posições do analisador e da boca artificial.

No QUADRO 14, têm-se os valores médios medidos do STI nos pontos selecionados das salas de aula. Além disso, as relações de sinal-ruído (RSR) foram coletadas, para que, posteriormente, pudesse ser realizado o estudo e a análise de novos cenários das simulações, considerando a introdução de ruído nas salas e verificando o impacto sobre o STI.

QUADRO 14 – VALORES MÉDIOS MEDIDOS DO STI

SALA		Pontos	RELAÇÃO SINAL RUÍDO - RSR MÉDIA [dB]							STI
			125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8kHz	
ANF. 14 Bio.	M	25	21,28	20,48	19,48	17,44	10,96	6,04	-9,32	0,63
	s		2,67	0,92	0,59	1,23	1,59	1,51	2,21	0,02
AUD. 1 Eng. Qui.	M	18	18,61	25,61	22,39	19,22	11,83	8,11	-3,61	0,71
	s		4,62	1,75	2,68	3,44	2,43	2,95	2,66	0,05
PG 06 Eng. Mec.	M	16	15,94	20,19	19,13	18,31	13,63	10,13	-1,44	0,56
	s		3,73	2,64	3,01	3,34	3,03	2,50	1,93	0,02
ANF. 04 Bio.	M	12	8,00	16,17	20,67	23,17	21,33	20,83	15,92	0,58
	s		3,28	3,69	3,26	2,66	2,77	1,64	1,62	0,02
ANF. 02 Bio.	M	11	14,09	22,55	21,91	19,36	11,09	9,27	-2,82	0,52
	s		2,43	3,08	2,30	1,80	2,02	1,85	1,83	0,03

FONTE: O autor (2019).

Nota-se, no QUADRO 14, valores negativos da RSR, principalmente em altas frequências. Este valor negativo provê indícios que o ruído de fundo nas salas foi superior ao nível de pressão sonora da excitação, gerada pela boca artificial.

5.2.3 Modelagem acústica das salas

A partir dos dados experimentais da seção 5.2.1, procedeu-se para a modelagem e a simulação das salas de aula, realizadas no *software* ODEON, versão 11. Em cada sala, foi realizada a catalogação dos aspectos construtivos mais relevantes. Estes aspectos incluíram as dimensões espaciais, geometria da sala, área das superfícies e material de revestimento destas superfícies. Consequentemente, houve necessidade de pesquisa em referencial bibliográfico sobre os coeficientes de absorção sonora correspondentes.

O QUADRO 15 mostra as dimensões máximas das salas e o volume destas. O volume das salas não foi calculado pela multiplicação das dimensões máximas, uma vez que a forma geométrica destas salas não era de um paralelepípedo perfeito e sim de sólidos diferentes. Portanto, o volume foi estimado pelo ODEON, versão 11.

QUADRO 15 – VOLUME E ABSORÇÃO MÉDIA DAS SALAS ESTUDADAS

SALA	LARGURA MÁXIMA - X	COMPRIMENTO MÁXIMO - Y	ALTURA MÁXIMA - Z	VOLUME* [m ³]
ANF. 14 Bio.	10,00	8,70	2,95	236,06
AUD. 1 Eng. Qui.	12,40	13,40	2,75	358,11
PG 06 Eng. Mec.	11,14	7,57	3,91	355,16
ANF. 04 Bio.	11,50	5,53	4,20	289,27
ANF. 02 Bio.	13,99	13,99	5,84	1200,77

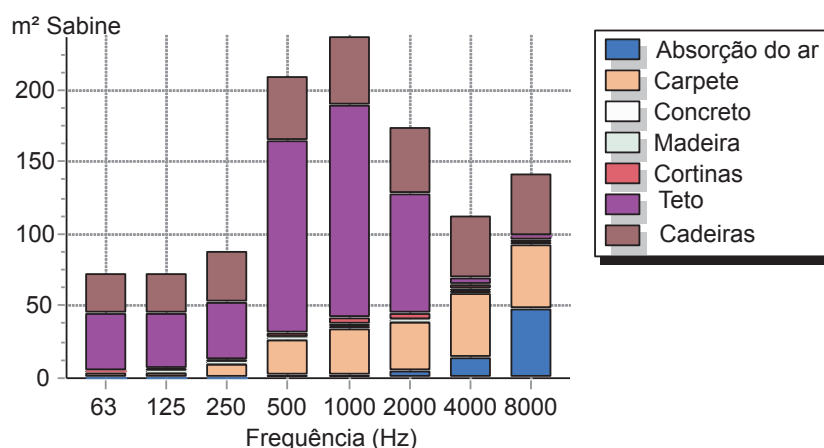
* Valores aproximados calculados pelo ODEON, versão 11.

FONTE: O autor (2019).

O efeito da audiência, conforme discutido na seção 4.3, e exposto no QUADRO 5, foi definido considerando a introdução nas simulações dos coeficientes de absorção sonora presentes na literatura. Com os dados das salas evidenciados no QUADRO 15 e com a planta baixa das salas, elencaram-se as superfícies relevantes para a modelagem.

No tocante à absorção, é pertinente verificar quais são as faixas em que a energia sonora é mais absorvida. Portanto, a FIGURA 22 representa um exemplo da absorção em termos de área, mensurada em Sabines, para o Auditório 1 da Engenharia Química. Os dados para as superfícies e seus respectivos coeficientes de absorção foram sintetizados no APÊNDICE 2, como já informados anteriormente.

FIGURA 22 – ÁREA DE ABSORÇÃO DISTRIBUÍDA NOS MATERIAIS NO AUD. 1 ENG. QUI

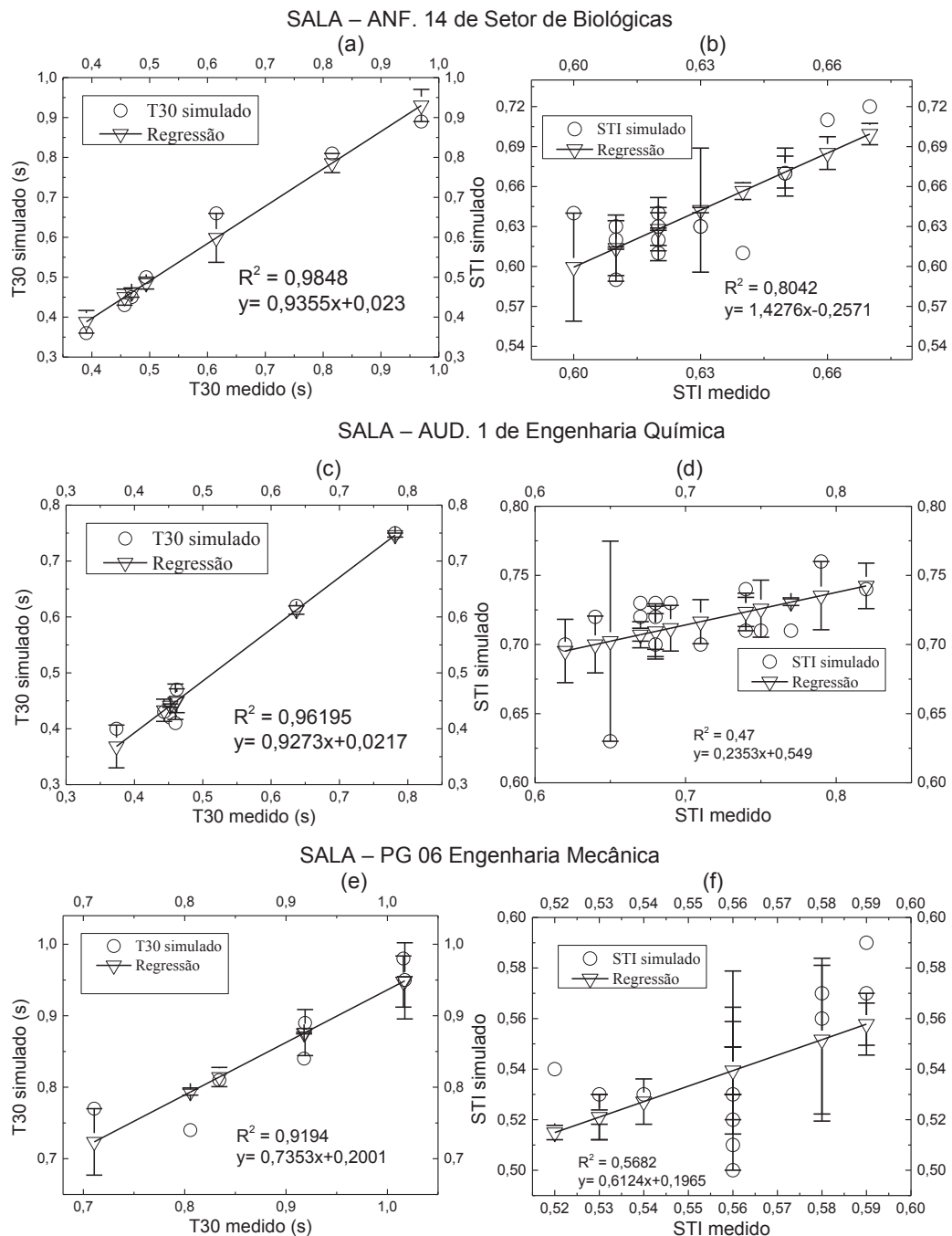


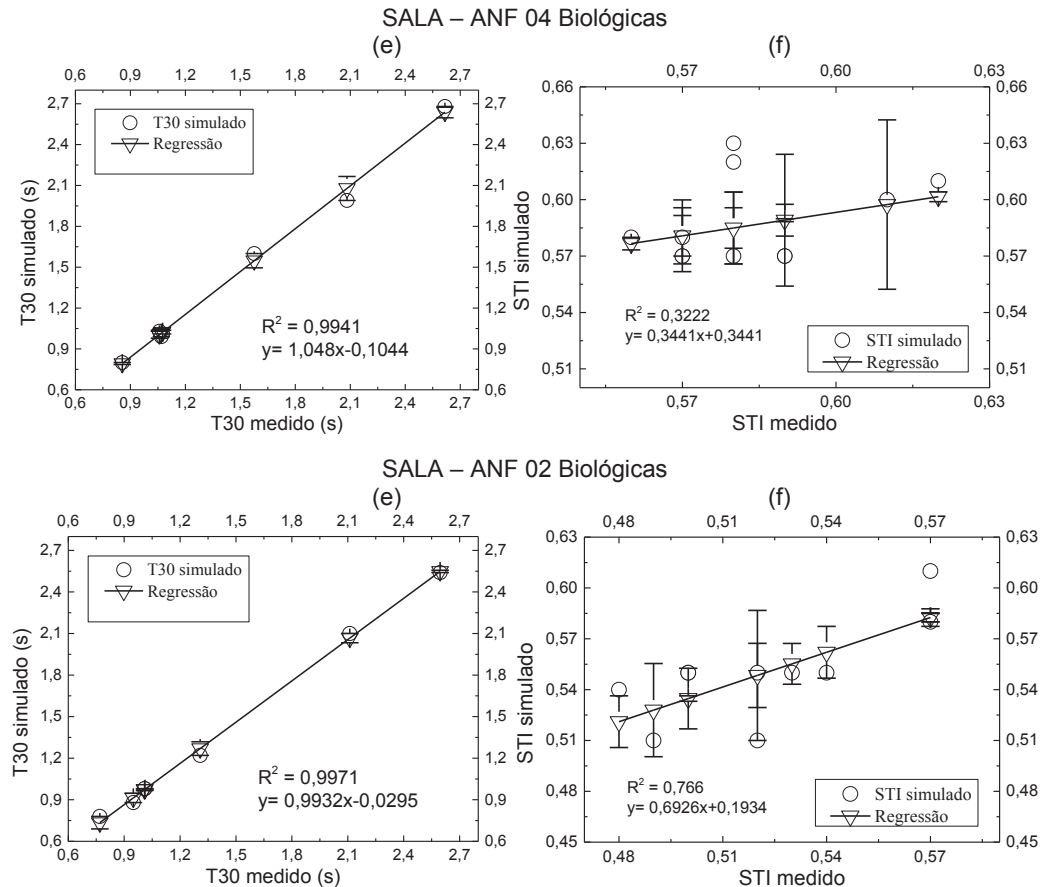
FONTE: O autor (2019).

Após a definição das superfícies relevantes, ajustaram-se as posições das fontes e receptores e, em seguida realizaram-se as simulações. A FIGURA 23 mostra os resultados das curvas de calibração dos modelos, para o T30 e para o STI, em todos os pontos de medições nas 5 salas estudadas. A banda de frequência para os

pontos mostrados na FIGURA 23 para o T30 foi entre 125 Hz a 8 kHz. Cabe ressaltar que para a validação das simulações foi utilizado o descritor T30, enquanto que realizar a avaliação da qualidade acústica das salas foi utilizado o descritor TR também representado como T60. Isto, deve-se sobretudo, ao fato de o TR ser mais consolidado na literatura, gerando dessa forma, mais trabalhos para a comparação dos dados.

FIGURA 23 – CURVA DE CALIBRAÇÃO PARA AS SALAS





FONTE: O autor (2019).

No QUADRO 16, apresenta-se a correlação R^2 entre os valores simulados e os valores medidos do T30, sendo que neste, T30m representa os valores medidos e T30s representa os valores simulados no *software* ODEON.

QUADRO 16 – ERROS E CORRELAÇÃO NA VALIDAÇÃO DAS SALAS SIMULADAS PARA O T30

SALA		Pontos	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8kHz	R^2
ANF 14 Bio.	T30m	4	0,97	0,82	0,62	0,49	0,47	0,46	0,39	0,97
	T30s		0,89	0,81	0,66	0,50	0,45	0,43	0,36	
	Erro %	--	8,22%	0,67%	7,27%	1,21%	4,00%	5,81%	7,81%	--
AUD. 1 Eng. Qui.	T30m	5	0,78	0,64	0,45	0,37	0,44	0,46	0,46	0,96
	T30s		0,75	0,62	0,42	0,40	0,43	0,47	0,41	
	Erro %	--	4,03%	2,67%	7,18%	7,02%	3,04%	1,73%	10,87%	--
PG 06 Eng. Mec.	T30m	5	0,71	0,83	0,92	1,02	1,02	0,92	0,81	0,91
	T30s		0,77	0,81	0,89	0,95	0,98	0,84	0,74	
	Erro %	--	8,33%	2,90%	3,13%	6,61%	3,52%	8,48%	8,14%	--
ANF. 04 Biológicas	T30m	5	2,62	2,08	1,58	1,08	1,07	1,06	0,86	0,99
	T30s		2,68	1,99	1,60	1,01	0,99	1,03	0,80	
	Erro %	--	2,43%	4,42%	1,54%	6,12%	7,34%	2,63%	6,52%	--
ANF. 02 Biológicas	T30m	5	2,60	2,11	1,31	1,01	1,01	0,95	0,77	0,99
	T30s		2,54	2,10	1,22	0,98	0,98	0,88	0,78	
	Erro %	--	2,13%	0,50%	6,71%	3,09%	2,91%	7,29%	1,38%	--

FONTE: O autor (2019).

Da mesma forma, no APÊNDICE 3, apresenta-se os desvios percentuais para cada um dos pontos medidos, com relação ao STI. Com base nos resultados validados a partir das medições experimentais, projetaram-se alguns cenários de simulação, para visualizar a possível variação espacial dos parâmetros acústicos, dentro da geometria de cada sala, conforme mostra a seção 5.3.

5.3 EFEITO DA DISTÂNCIA ENTRE A FONTE E O RECEPTOR

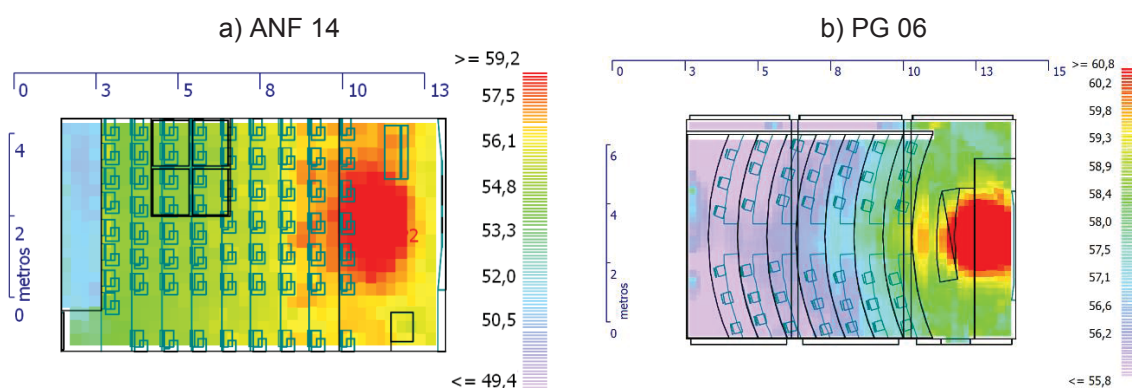
Esta seção tem como objetivo demonstrar através do uso de simulações, após estas salas serem validas, o efeito que a distância produz nos descritores Leq, STI, D50, U50, EDT e D50 usando os mapas de cores gerados pelo ODEON. Além disso, investiga-se o efeito da introdução de audiência nas salas, mostrando o exemplo para o descritor D50.

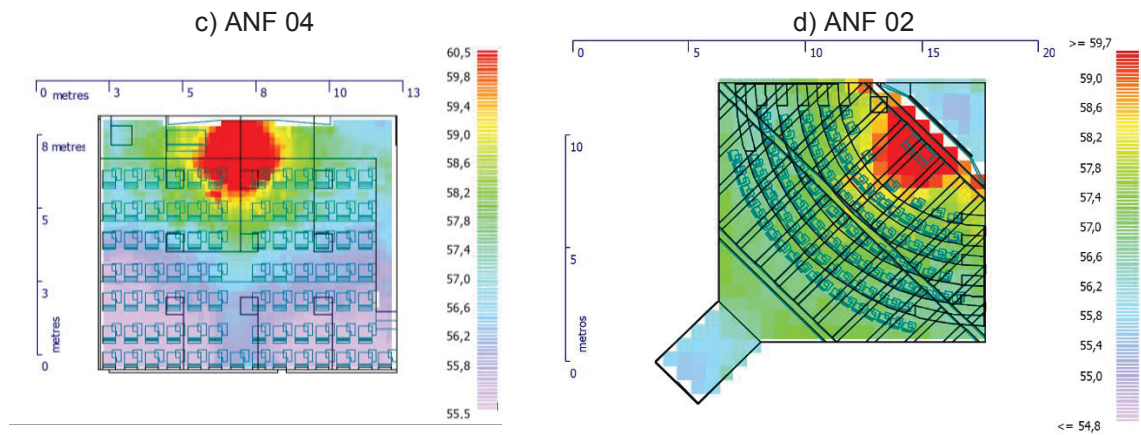
Uma vez que segundo a ISO 3382-2 (ISO, 2008), afirma que o TR é um caracterizador físico da sala, este não possui uma importância subjetiva. A importância subjetiva, por sua vez, segundo a ISO fica a cargo do EDT, pois este representa melhor a percepção de ouvir dentro da sala.

Por outro lado, conforme a revisão da literatura, ver seção 3.4.4, fica evidente que os efeitos das energias diretas e atrasadas, possuem um efeito subjetivo relacionado com a inteligibilidade e com a qualidade acústica em geral.

Com isto, a FIGURA 24 evidencia a alteração do Leq nas salas validadas em função da distância entre a fonte e o receptor. As salas foram validadas perante o valor de calibração de 60 dB na saída da boca artificial para o STI, conforme (IEC, 2011).

FIGURA 24 – EXEMPLO DA ATENUAÇÃO ESPACIAL DO Leq [dB]



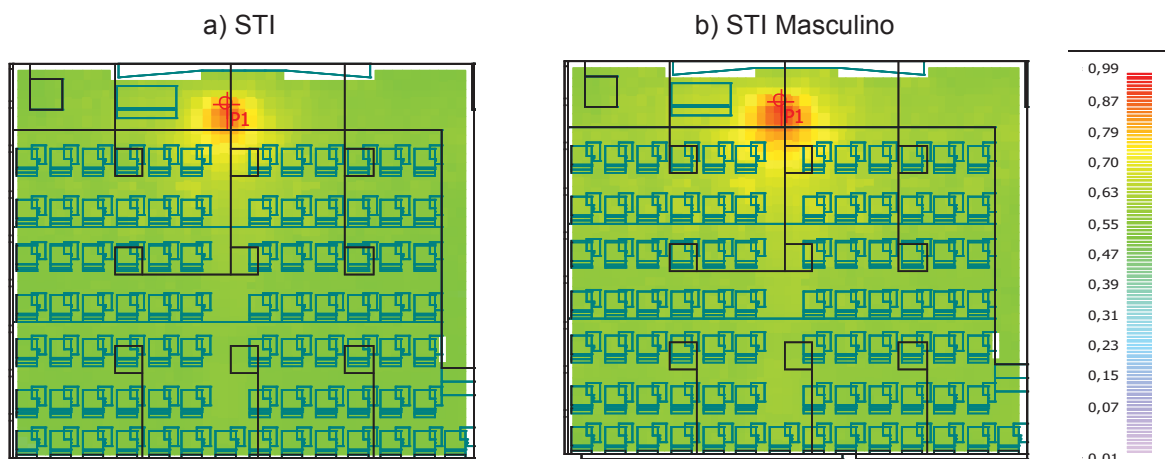


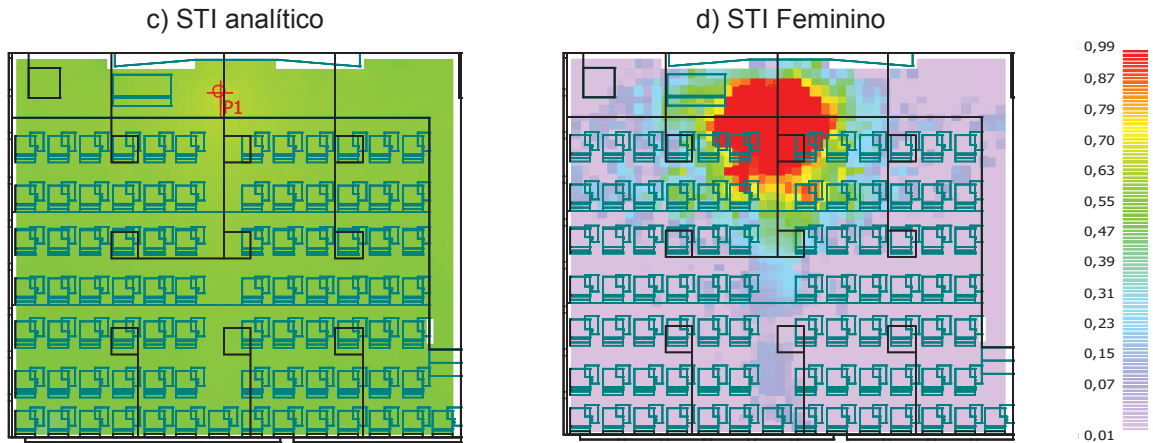
FONTE: O autor (2019).

O STI pode ser medido experimentalmente de três formas alterando o filtro na saída da boca artificial, que pode ser o filtro de gênero, STI masculino, STI feminino, e STI neutro, sem a ponderação de gênero. Cada filtro resultará em diferentes valores dos fatores de redução de modulação (ver seção 2.4.2), que por sua vez resultam em valores de STI diferentes, aplicando a Eq.(22). Além destas, os fatores de redução de modulação podem ser calculados de forma analítica pela Equação de Schroeder, Eq. (17), em função do tempo de reverberação (T_{60}) e pela RSR, consequentemente com os fatores de redução de modulação, estimados pela Eq. (17) obtém-se via a Eq.(22) o STI denominado de analítico.

Cada uma destas formas de estimar os fatores de modulação resulta em um valor diferente para o STI. O efeito destes filtros pode ser visto na FIGURA 25, a qual foi exemplificada para o ANF. 14.

FIGURA 25 – ATENUAÇÃO ESPACIAL DO STI CALCULADO EM FUNÇÃO DO TIPO DE STI



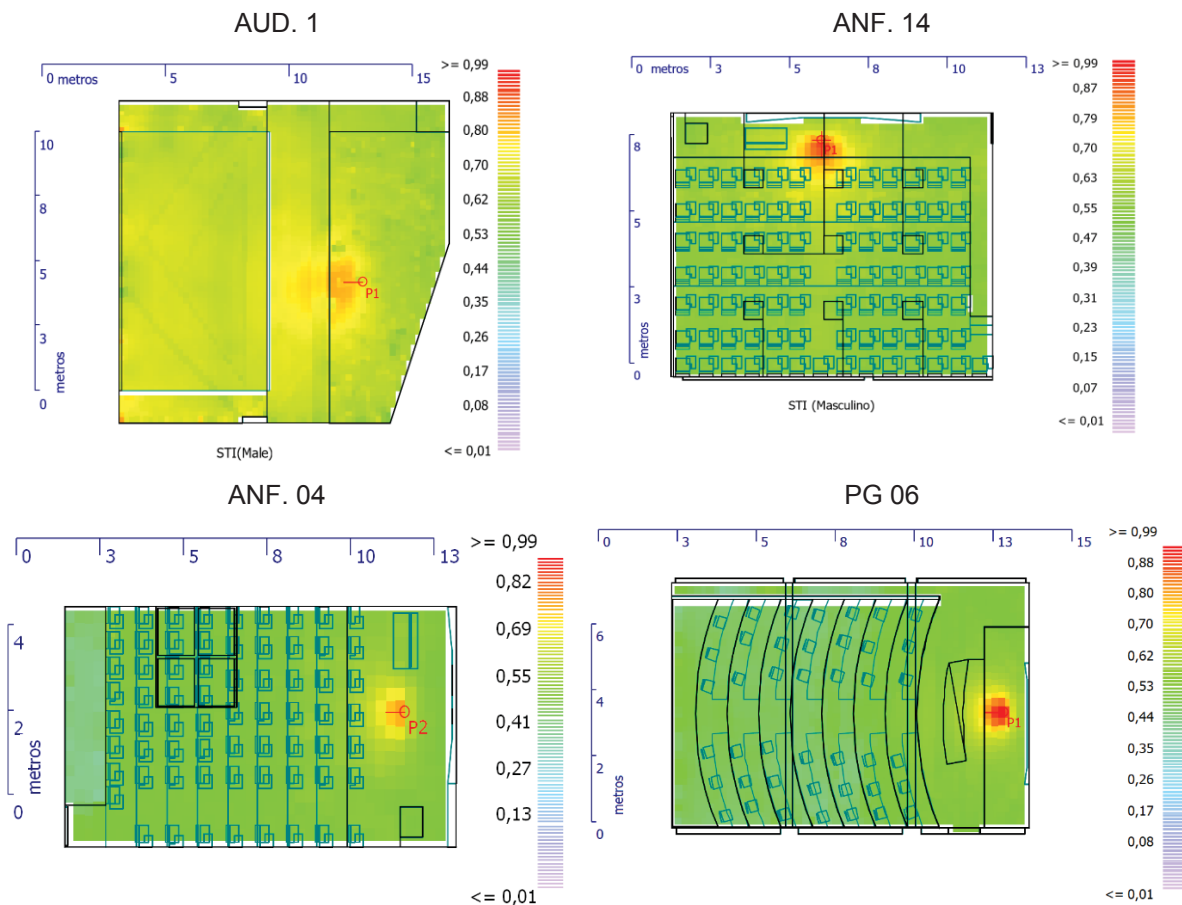


FONTE: O autor (2019).

Nota-se que os valores de STI, U50 e EDT são altamente dependentes da localização da fonte. A posição da fonte é mostrada na

FIGURA 26 e nesta verifica-se a atenuação do STI conforme o afastamento entre a fonte e a posição do receptor.

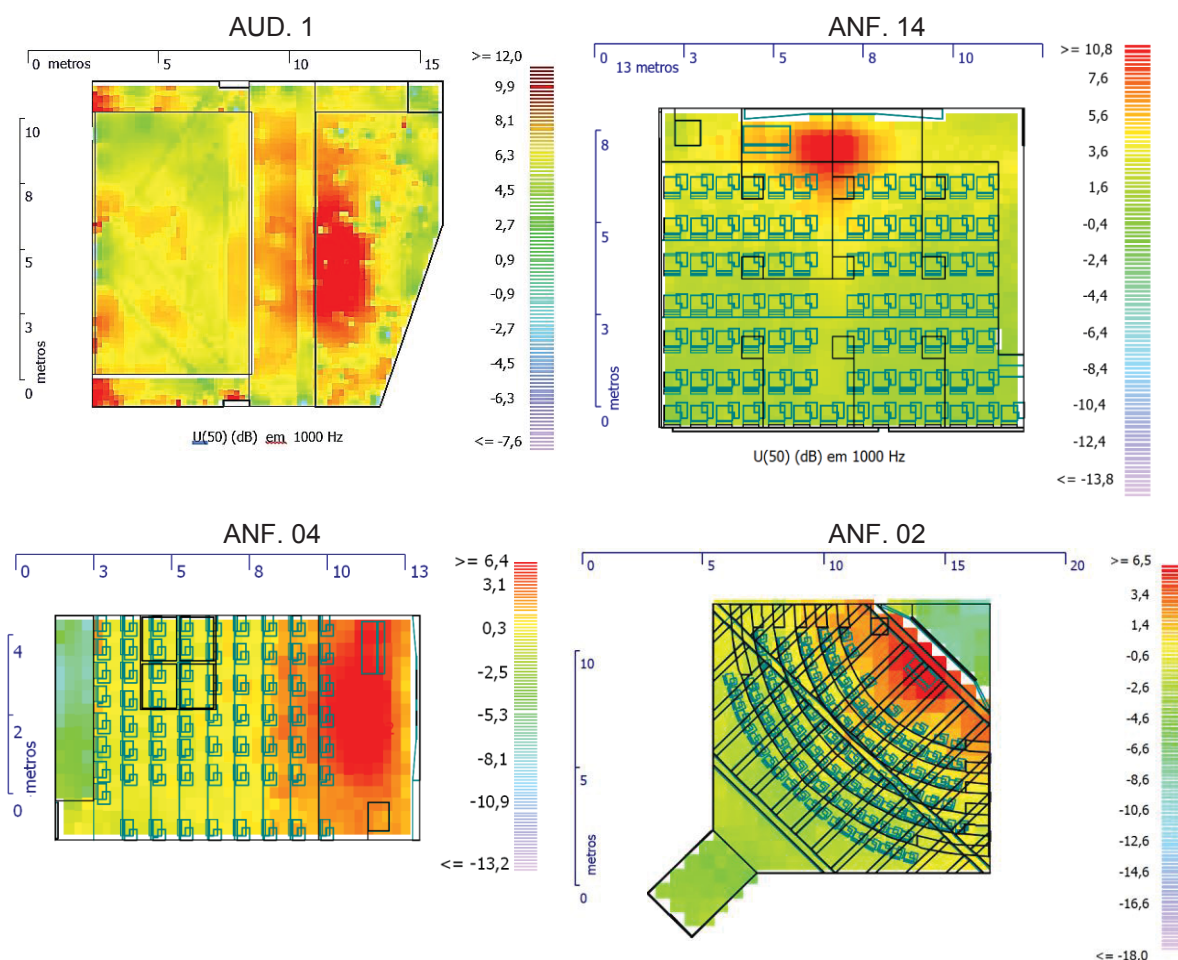
FIGURA 26 – VARIAÇÃO ESPACIAL DO STI NAS SALAS DE AULA



FONTE: O autor (2019).

Similarmente, verifica-se, com base na FIGURA 27, como o U50 também varia consideravelmente em função da distância entre a fonte e o receptor. Assim, identifica-se um comportamento em comum entre as respostas do U50 e do STI.

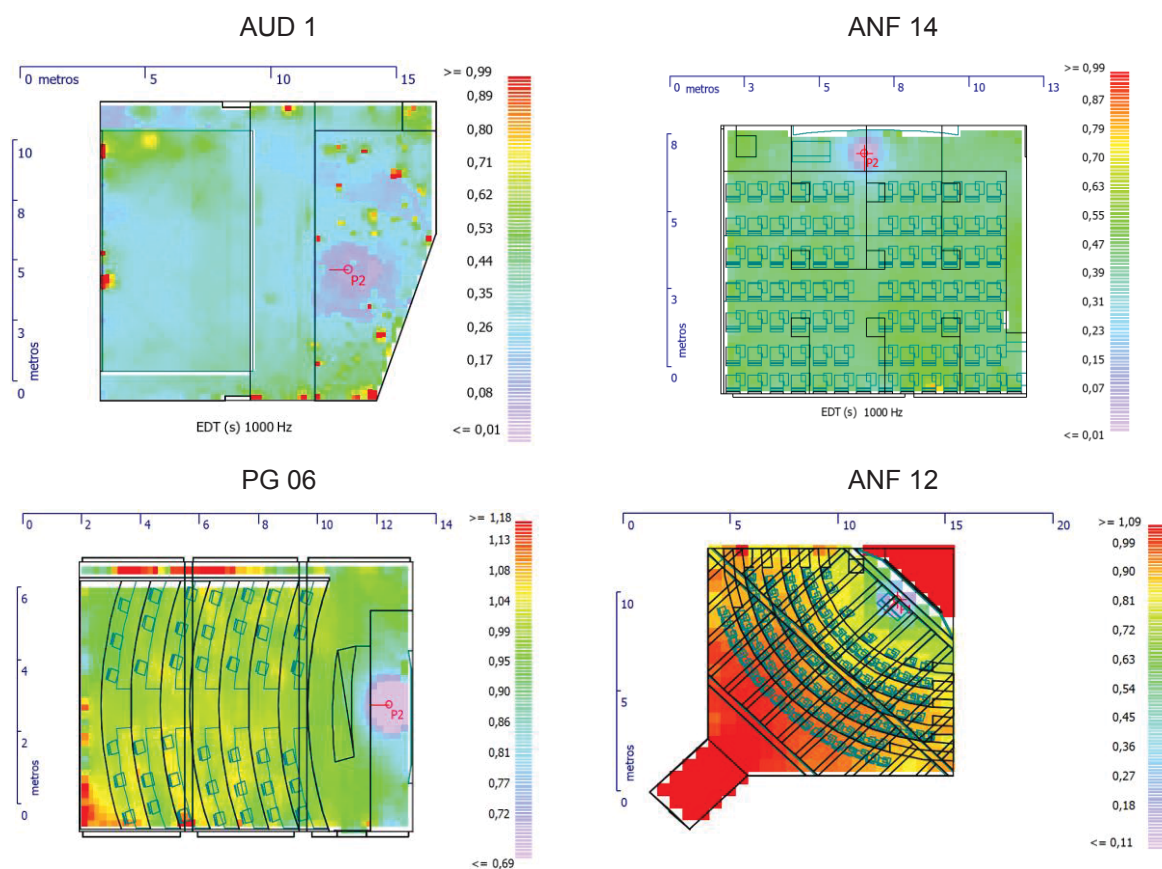
FIGURA 27 – VARIAÇÃO ESPACIAL DO U50 EM 1 kHz NAS SALAS DE AULA



FONTE: O autor (2019).

Por sua vez, a FIGURA 28 também mostra a variação associadas aos valores do EDT em função da distância entre a fonte e o receptor. Nesta, constata-se o efeito que a distância tem sobre este EDT, revelando atenuação da energia direta no receptor para posições de afastamento elevadas, fato similar observado também no STI.

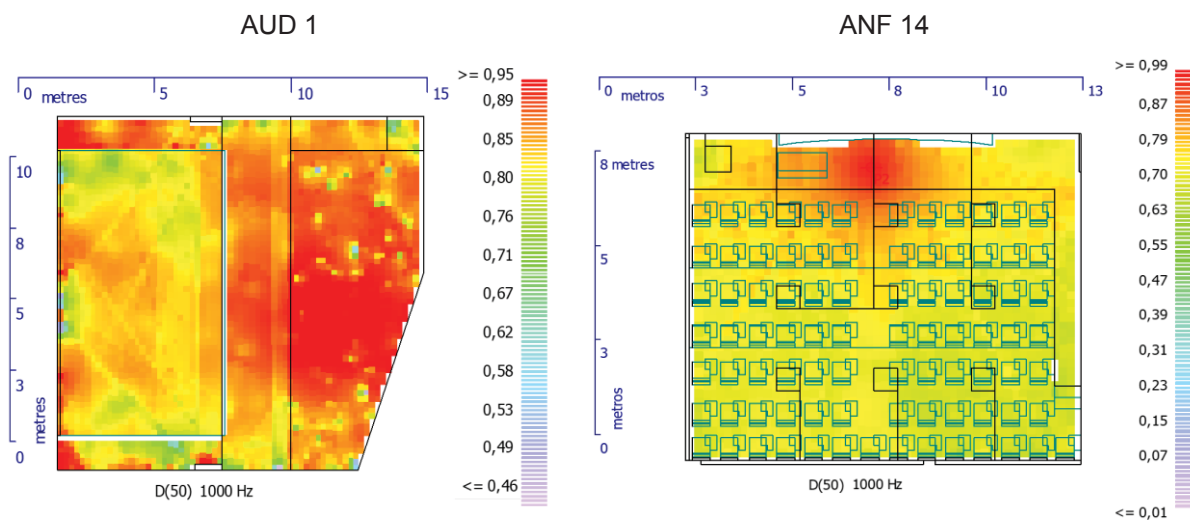
FIGURA 28 – VARIAÇÃO ESPACIAL DO EDT NAS SALAS DE AULA

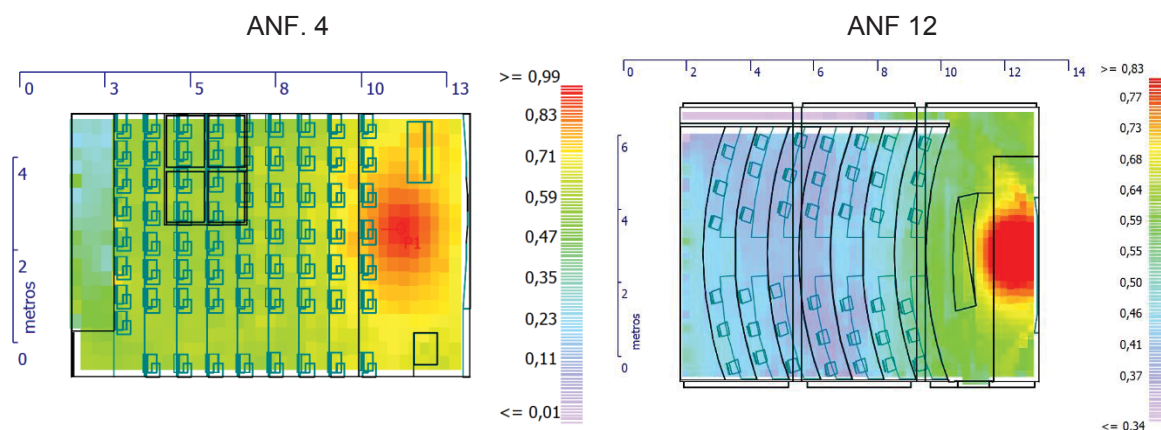


FONTE: O autor (2019).

Neste viés, os valores de D50, simulados com a fonte sonora dodecaédrica são mostrados na FIGURA 29, mostrando também o efeito da redução do D50 conforme o afastamento entre a fonte e o receptor.

FIGURA 29 – VARIAÇÃO ESPACIAL DO D50 NAS SALAS DE AULA

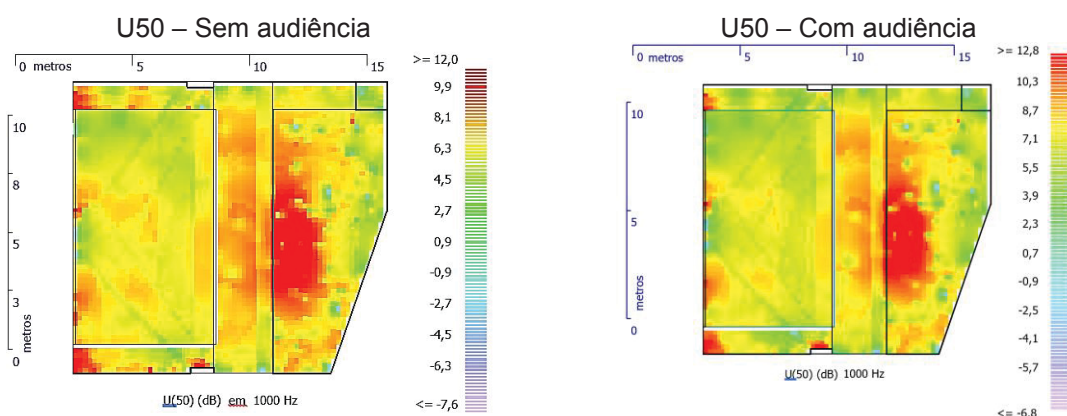




FONTE: O autor (2019).

A FIGURA 30 por sua vez, evidencia o efeito da audiência, o que introduz a alocação de superfícies com grande área equivalente e com altos coeficientes de absorção sonora.

FIGURA 30 – EFEITO DA INTRODUÇÃO DE AUDIÊNCIA NA SALA SOBRE O U50 EM 1 kHz



FONTE: O autor (2019).

Com as salas de aula devidamente validadas e simuladas, expõe-se na seção 5.3, a exemplificação do procedimento para quantificar as correlações entre os descritores de interesse e avaliar como as características acústicas e construtivas das salas interferem sobre os valores de inteligibilidade da fala em salas de aula.

5.4 PROCEDIMENTO DE AVALIAÇÃO DE SIGNIFICÂNCIA E CORRELAÇÕES

Nesta seção, os resultados são apresentados em primeiro momento com enfoque na interpretação gráfica. Em particular, devido à quantidade de tabelas, os

resultados são apresentados em mais detalhes para a sala AUD. 1 ENG. QUI, apenas para título de exemplificação. Os demais valores, para as outras salas, são consideradas como a média já pré-processada pela ACP.

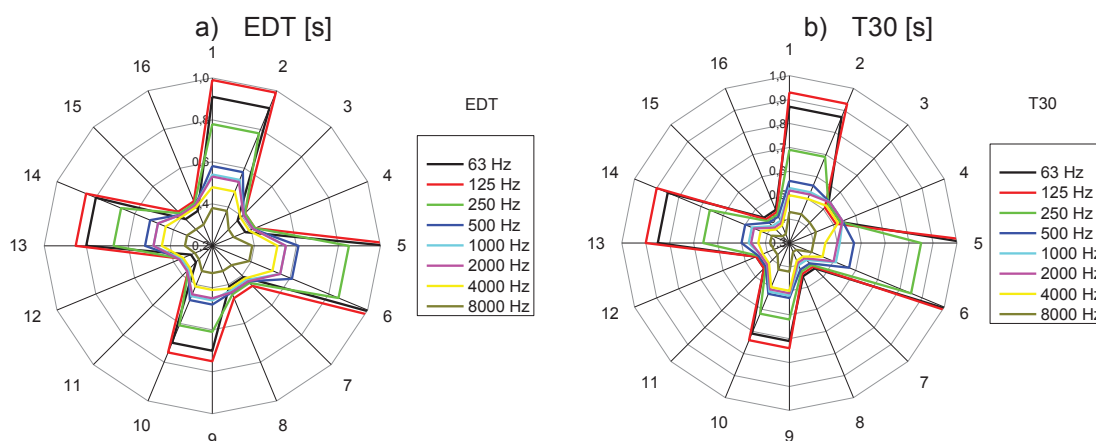
5.4.1 Procedimento para a obtenção dos postos de significância

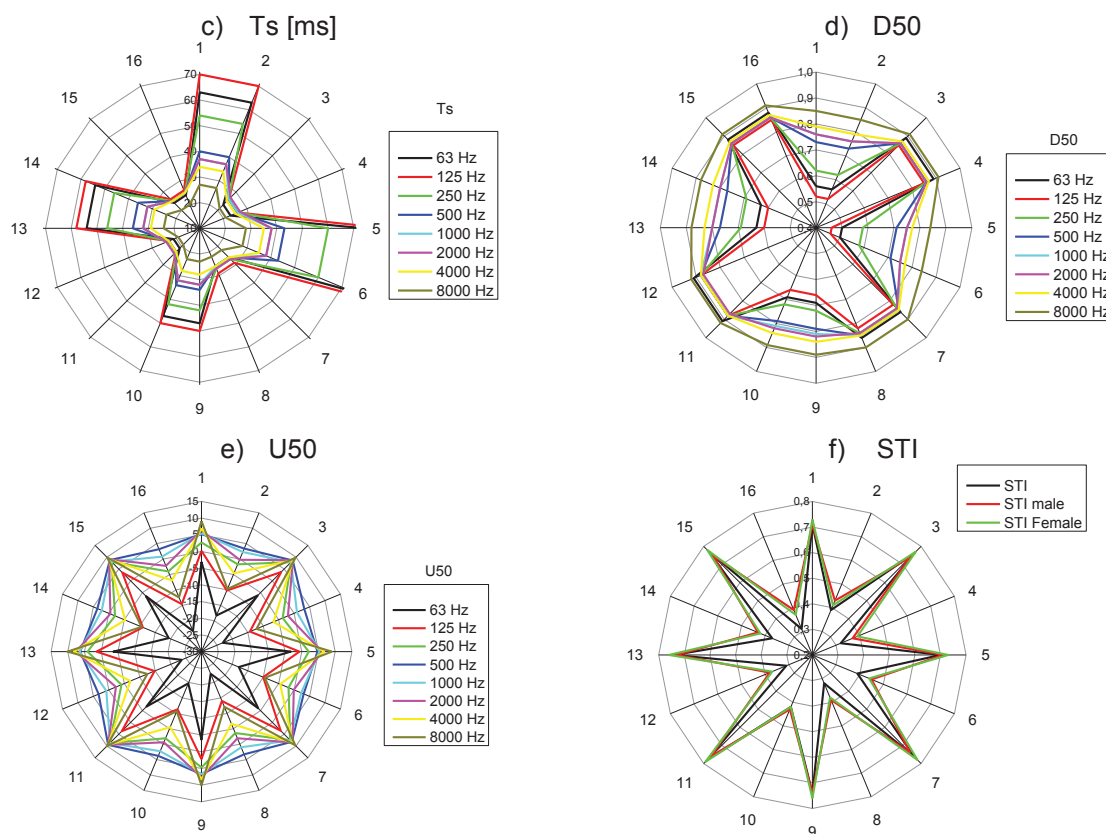
Fundamentando-se nos resultados validados na seção 5.2, simulou-se um novo conjunto de respostas para cada sala, ao aplicar as condições estabelecidas no DOE, apontadas no QUADRO 4. As novas respostas simuladas foram relativas aos descritores EDT [s], T30 [s], Ts [ms], D50 [%] e U50 [dB], na faixa das bandas de oitava entre 63 Hz até 8 kHz. Os demais descritores considerados foram o STI, o STI masculino e o STI feminino.

Conforme o mesmo procedimento definido na seção 5.2, somente alguns resultados individuais são apresentados, a título de visualização. Procedeu-se com as simulações dos descritores para as 5 salas medidas, gerando 16 salas virtuais para as combinações e totalizando 80 salas virtuais ao todo. Nota-se que os dados do ruído de fundo (ver QUADRO 8) foram alimentados nas simulações para o cálculo do STI. Ao total, as 16 combinações para avaliar efeito dos quatro fatores controláveis foram feitas.

Na FIGURA 31, mostra-se a exemplificação da distribuição dos efeitos em função de cada rodada do DOE, (ver QUADRO 4), na Sala do Auditório 1 da Engenharia Química, calculado conforme a Eq. (29). A análise do C50 não foi realizada pois este está relacionado analiticamente com o D50 segundo a Eq. (15).

FIGURA 31 – DISPOSIÇÃO MULTIBANDA DOS DESCRITORES VIA DOE





FONTE: O autor (2019).

Verifica-se visualmente na FIGURA 31 a existência de certo padrão associado à disposição de cada um dos descritores. Isso ocorre particularmente entre os descritores correlacionados, segundo a literatura, com a inteligibilidade da fala ou com a qualidade da fala em salas de aula, ou seja, os itens (d, e, f) da FIGURA 31. De forma análogo, verifica-se que os descritores associados ao tempo de reverberação apresentam uma disposição característica visualizada por meio dos itens (a,b,c) da FIGURA 31.

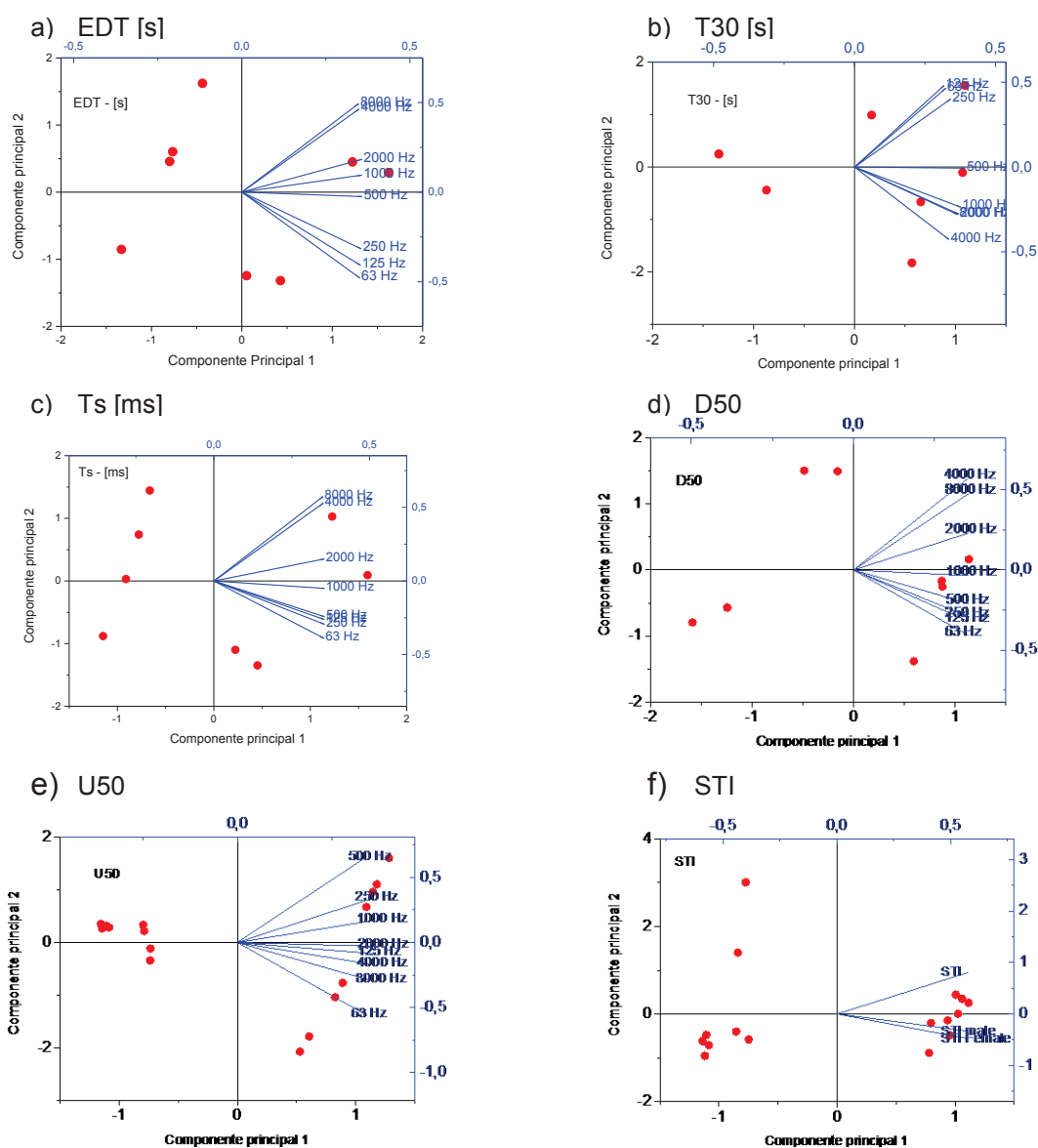
5.4.2 Análise da aplicação do ACP sobre as matrizes do DOE

Para fins de estudar estatisticamente os efeitos combinados e individuais de cada fator controlável, aplicaram-se as os procedimentos da ACP sobre as matrizes do DOE, provenientes do QUADRO 6. Em especial, uma análise nas bandas de oitava foi realizada, a fim de investigar se existem correlações que se estabelecem entre diferentes faixas de frequências, ou se, mesmo com a variação das frequências, as

correlações, mantêm-se as idênticas, conforme o estabelecido nos objetivos do presente trabalho.

Portanto, para consolidar estas análises, investigou-se a quantidade mínima necessária de componentes principais. Como os descritores avaliados apresentam escalas diferentes, empregou-se a ACP por meio da normalização dos descritores (ver Eq. (34)), em concordância com as 16 combinações do DOE, para cada um dos descritores multibandas (ver FIGURA 16). Dessa forma, a FIGURA 32 mostra o gráfico denominado de *biplot* (ver final da seção 4.4), em que se mostra a redução da dimensionalidade dos fatores.

FIGURA 32 – *BIPLLOT* DA ACP PARA A SALA AUD. 1 ENG. QUI.



FONTE: O autor (2019).

Apesar da FIGURA 32 mostrar apenas os dois primeiros componentes principais, o número de componentes principais só é limitado pela quantidade das variáveis no modelo original. O QUADRO 17 mostra a magnitude dos autovalores e, consequentemente, a explicação da variância conjunta em função da quantidade de componentes principais para a sala AUD. 1 ENG. QUI., que serve como exemplo.

QUADRO 17 – VARIÂNCIA EXPLICADA EM FUNÇÃO DOS COMPONENTES PRINCIPAIS

COMPONENTE	EDT	T30	Ts	D50	U50	STI
Componente 1	97,20%	80,52%	98,58%	98,70%	95,84%	99,84%
Componente 2	99,48%	99,33%	99,55%	99,84%	99,72%	99,95%
Componente 3	99,81%	99,85%	99,85%	99,93%	99,96%	100,00%
Componente 4	99,97%	99,93%	99,97%	99,98%	99,98%	--
Componente 5	100,00%	99,97%	99,99%	99,99%	99,99%	--
Componente 6	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	--
Componente 7	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	--
Componente 8	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	--

FONTE: O autor (2019).

Não obstante, verificou-se, por meio do QUADRO 17, que, com a variação das frequências, as características dinâmicas das respostas não alteraram com a quantidade de componentes principais, motivo pelo qual optou-se por apenas utilizar apenas o primeiro componente principal para representar cada um dos descritores multibandas. Com isto, as novas correlações para as variáveis representadas após a redução dimensional para o primeiro componente foram calculadas. O exemplo deste procedimento é mostrado no QUADRO 18, que representa a sala de aula AUD. 1 ENG. QUI.

QUADRO 18 – INTRACORRELAÇÕES DOS DESCRITORES – AUD. 1 ENG. QUI.

	EDT	T30	Ts	D50	U50	STI
EDT	1	0,7351	0,9907	-0,9935	-0,0469	0,015
T30		1	0,7945	-0,7621	-0,0294	0,016
Ts			1	-0,9985	-0,0442	0,018
D50				1	0,0446	-0,018
U50					1	0,9934
STI						1

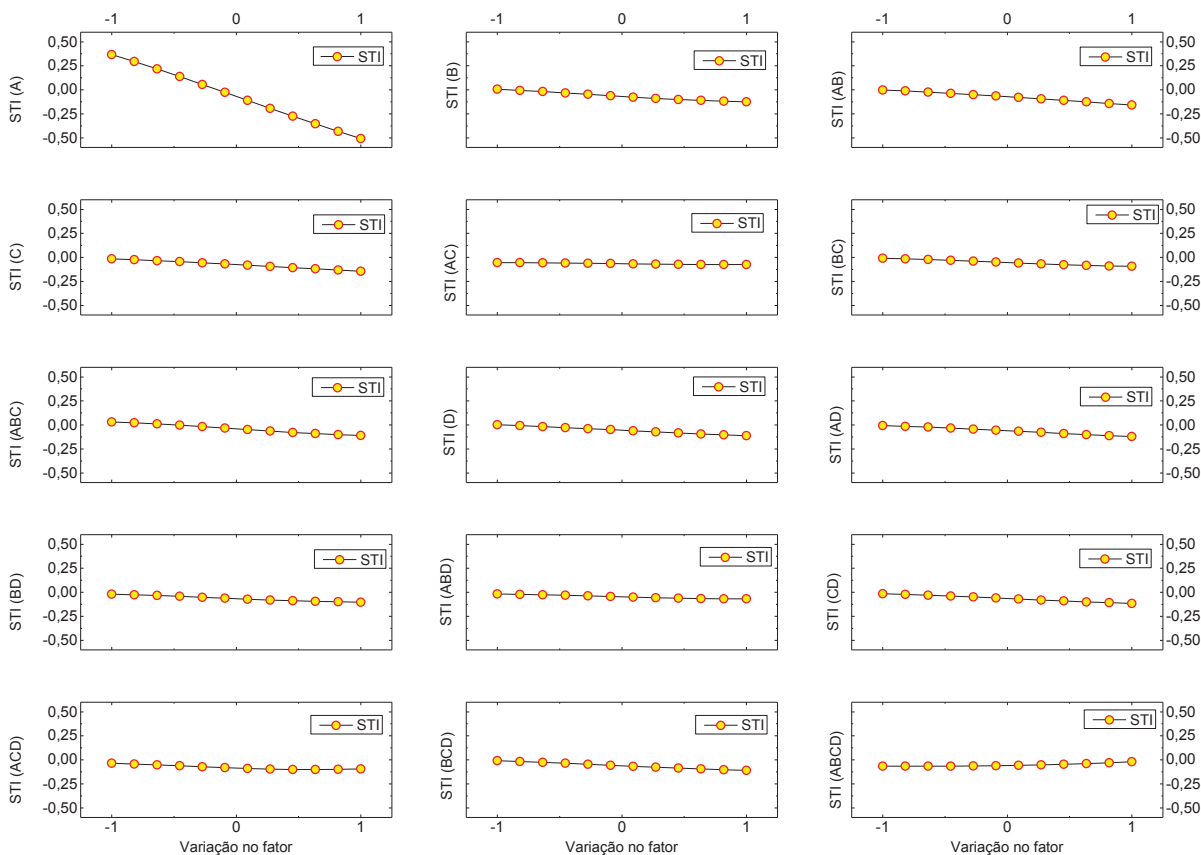
FONTE: O autor (2019).

Deste modo, procedeu-se para a próxima etapa do estudo, que foi avaliar as significâncias pelo DOE e, posteriormente, pelo MPM, com treinamento das Redes Neurais Artificiais.

5.4.3 Análises de significância via DOE e MPM

De posse das respostas dos descritores (T30, Ts, EDT, D50, U50 e STI) reduzidas para o primeiro componente principal, conforme mostrados nas curvas da FIGURA 32, aplicou-se a RLM via Eq. (29), e obtiveram-se os coeficientes de significância para o DOE, que é o dobro dos valores dos regressores $\hat{\beta}$. De forma similar, utilizando as redes neurais via MPM foram plotadas na FIGURA 33, as curvas *profile* associadas, para todos os fatores e suas interações considerando como resposta o STI, numa escala de 12 pontos, escalonada nos eixos das abcissas entre a faixa de -1 a +1, aplicando-se a Eq. (39).

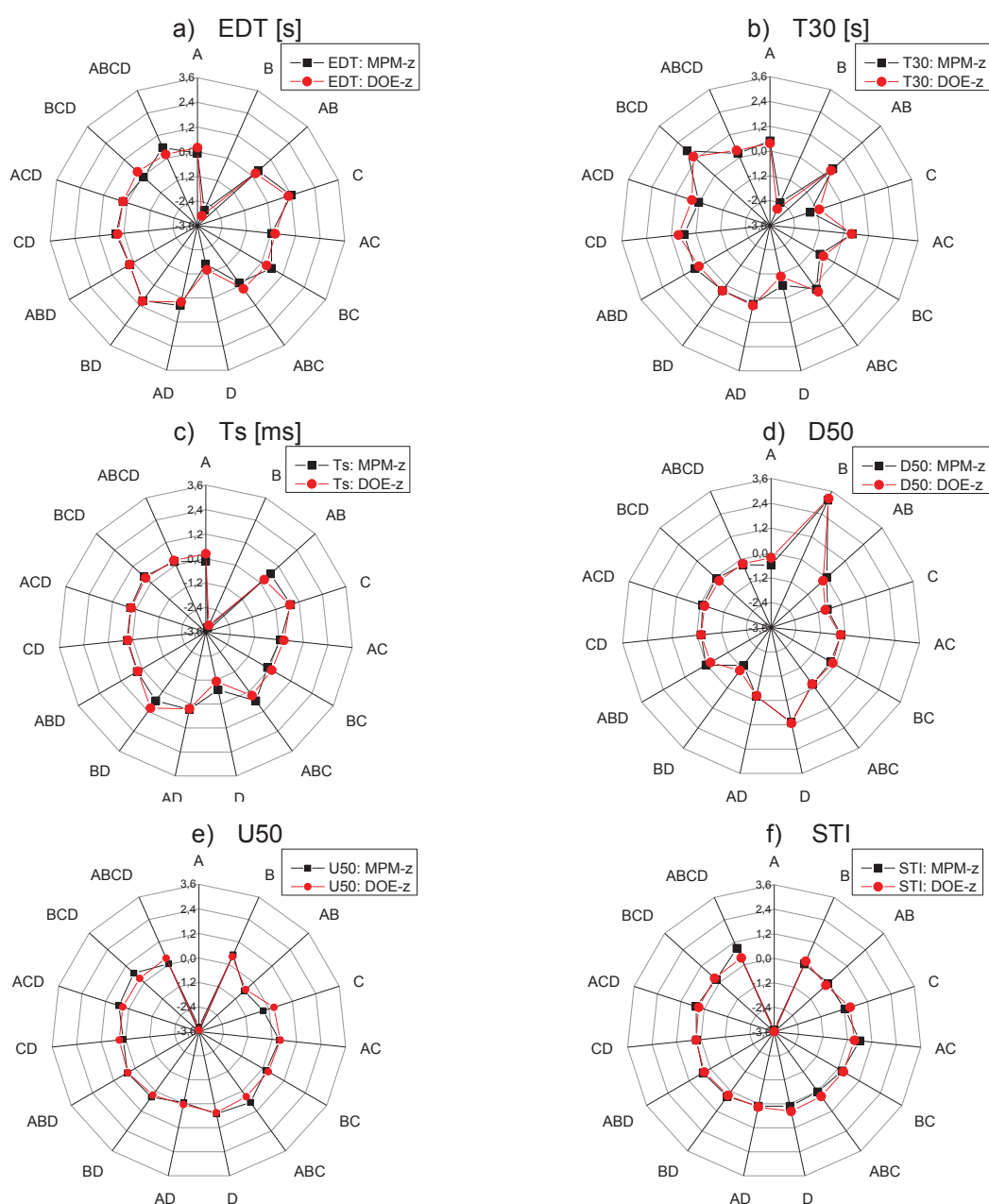
FIGURA 33 – CURVAS *PROFILE* DO MPM PARA O STI COMO RESPOSTA NO AUD. 1 ENG. QUI.



FONTE: O autor (2019).

Na FIGURA 33 consolidou-se a estimativa dos efeitos de significância para os fatores controláveis e as suas respectivas interações. O termo variação da resposta, deve ser compreendido como cada um dos 16 fatores controláveis interfere individualmente na saída da RNA. Para uma melhor visualização dos efeitos, sua disposição e magnitude foram plotadas na FIGURA 34, em que se tem o comparativo entre os DOE-z e MPM-z, para os descritores T30, Ts, EDT, D50, U50 e STI, para a sala AUD. 1 ENG. QUI. como exemplo.

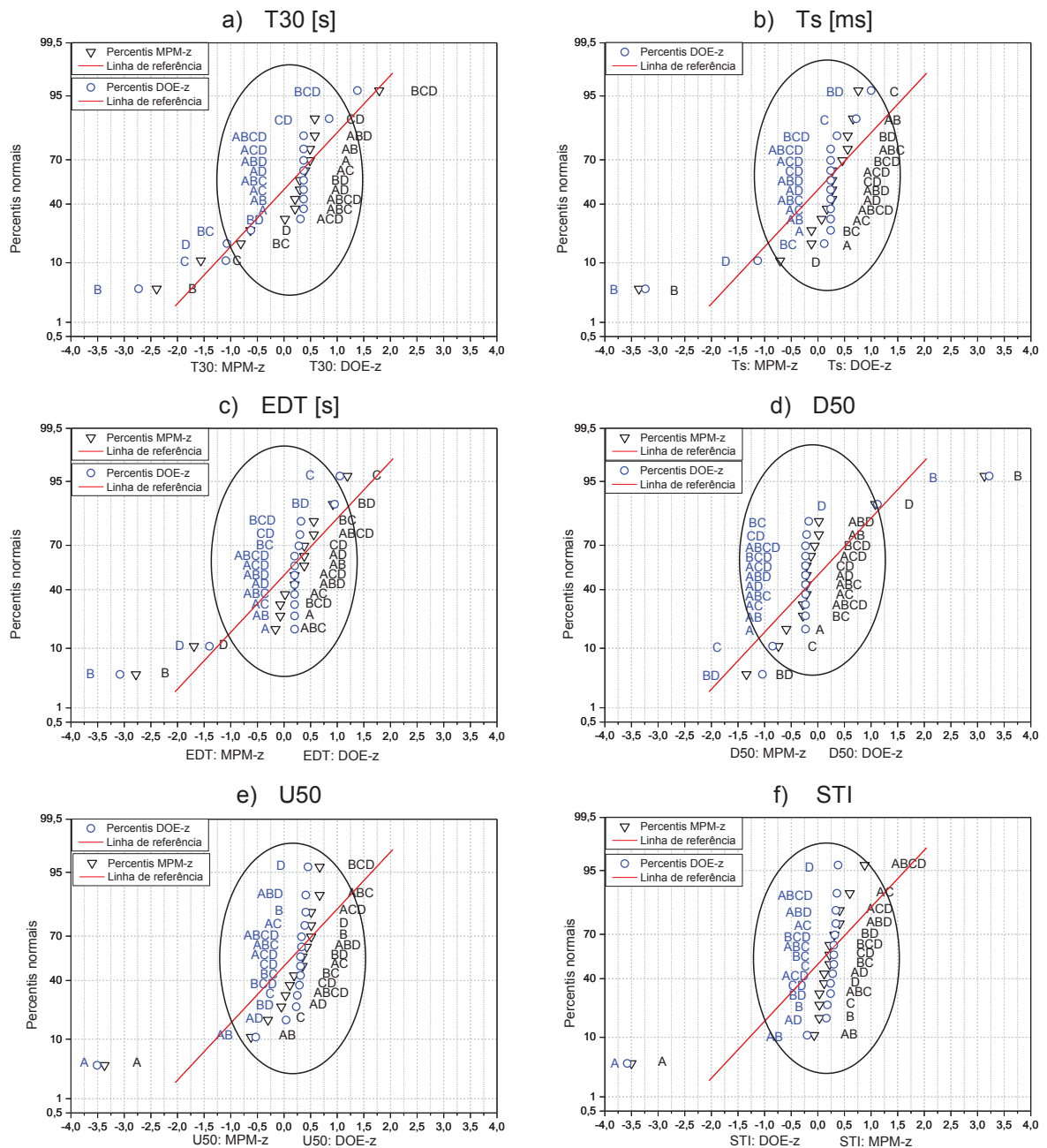
FIGURA 34 – DISPOSIÇÃO DOS EFEITOS EM FUNÇÃO DOS FATORES CONTROLÁVEIS



FONTE: O autor (2019).

Portanto, seguindo as recomendações da seção 4.3, gerou-se o gráfico da distribuição normal dos efeitos, consolidados na FIGURA 35. Nesta é possível avaliar os efeitos quantitativamente, uma vez que, apenas com o gráfico da FIGURA 34, não identifica-se facilmente quais são os efeitos de maior significância. Na FIGURA 35, os efeitos mais afastados da origem possuem maior significância do que aqueles próximos à região da origem, o que corresponde a região circulada.

FIGURA 35 – DISTRIBUIÇÃO NORMAL DOS EFEITOS DOE-z E MPM-z NO AUD. 1 ENG. QUI.

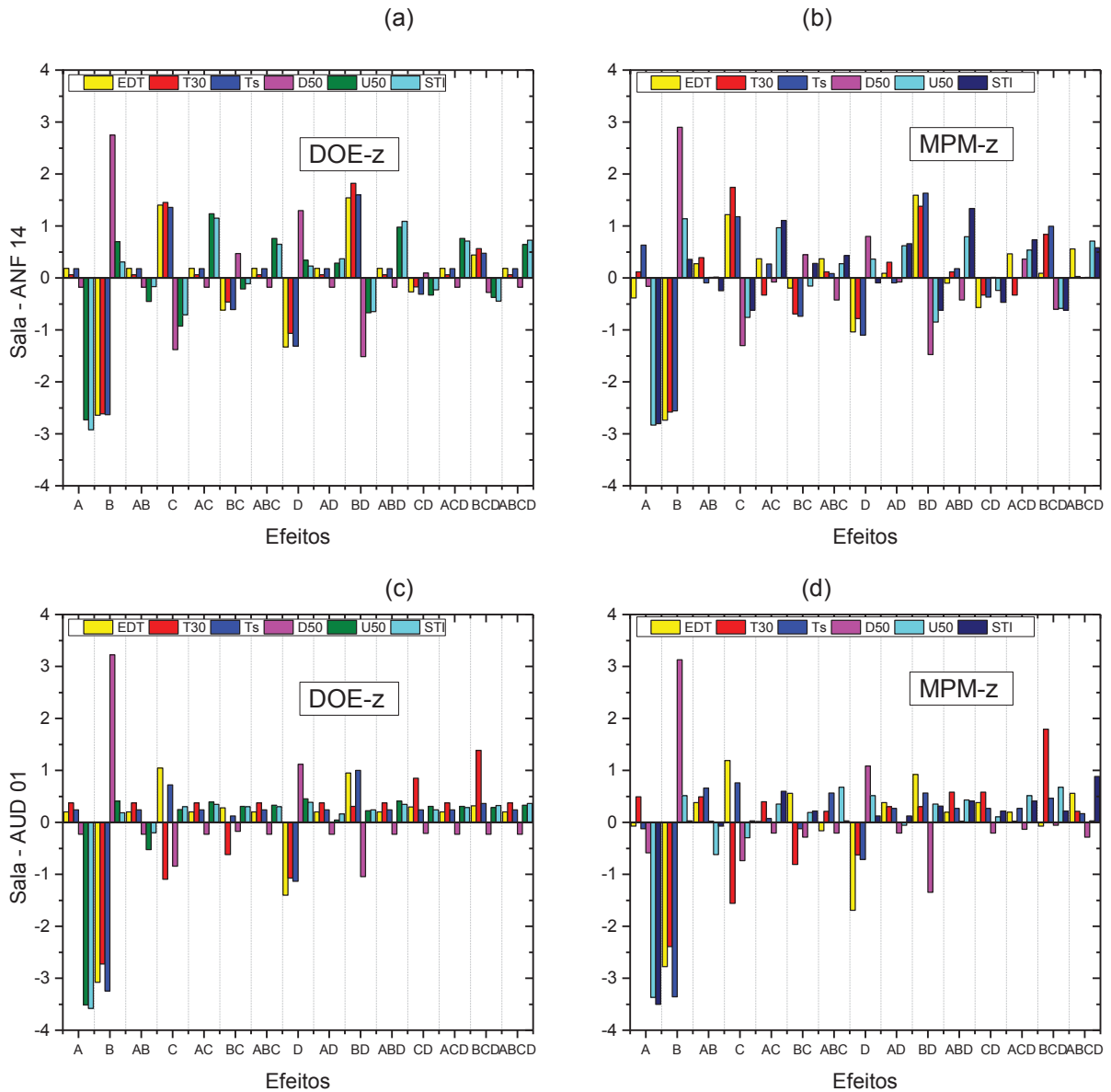


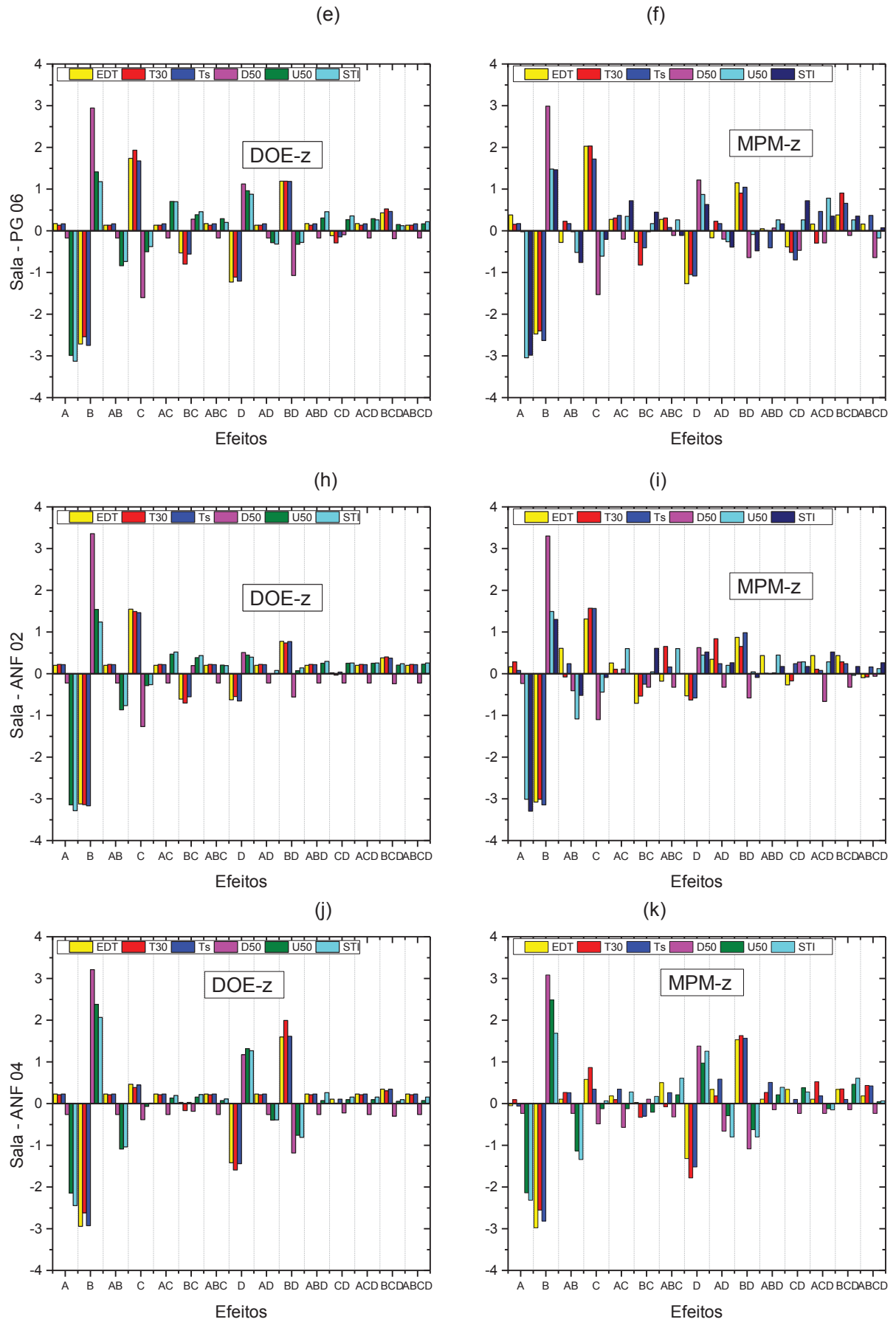
FONTE: O autor (2019).

Finalmente, seguindo a última etapa do algoritmo proposto na FIGURA 12, que aborda a comparação dos resultados obtidos por DOE-z e por MPM-z, tem-se a representação da magnitude dos efeitos, calculados para cada uma das salas. Portanto, o gráfico da FIGURA 36 representa o posto dos efeitos através de um gráfico de barras, em que se pondera o efeito positivo ou negativo. Os efeitos foram codificados conforme estabelecido na TABELA 8. Observa-se que a escala nos gráficos da FIGURA 36 é a mesma, o que permite uma comparação direta entre as salas.

Os dados completos dos coeficientes de significância podem ser consultados no APÊNDICE 5.

FIGURA 36 – COMPARAÇÃO DOS EFEITOS POR SALA VIA DOE-z e MPM-z





FONTE: O autor (2019).

Com os resultados da FIGURA 36, é possível perceber visualmente a distribuição dos efeitos, em função das condições acústicas das salas, sobre cada descritor. Nota-se certa uniformidade para a atribuição dos efeitos, na medida em que, para as 5 salas estudadas, verificou-se regularidade nessa atribuição. Este fato é válido para os dois métodos, MPM-z e o DOE-z. As discussões sobre estes resultados são devidamente apresentadas na seção 6.3.

Neste capítulo foi exemplificado todo o procedimento de análise e consolidação dos resultados, seguindo o algoritmo proposto na FIGURA 12, usando para tanto, a sala AUD. 1 ENG. QUI. como exemplo de aplicação. Não se adentrou sobre as discussões dos resultados. No próximo capítulo, essas discussões são apresentadas para todas as salas propostas inicialmente.

6 DISCUSSÕES

Este capítulo é estruturado da seguinte forma: 1) na seção 6.1 discute-se a adequação acústica das salas, perante as normas; 2) na seção 6.2, aborda-se o estudo das correlações entre os descritores acústicos, discutindo os resultados obtidos e comparando-os com a literatura e 3) na seção 6.3 discute-se um estudo sobre a influência dos descritores acústicos sobre o STI.

6.1 AVALIAÇÃO NORMATIVA DAS SALAS

No capítulo 5, foi feita a consolidação dos resultados das medições experimentais, adentra-se agora para a verificação normativa, quanto à qualidade acústica das salas estudadas. Para cada descritor apresentou-se os valores de referência e os valores das medições realizadas.

Sobre as curvas de ruído - NC, observa-se no QUADRO 19, um compêndio sobre os valores medidos das curvas NC, frente às normas NBR 10152:1987 (ABNT, 1987) e a ANSI S12.2:2008 (ANSI/ASA, 2008).

QUADRO 19 – COMPARAÇÃO DAS CURVAS DE RUÍDO - NC

SALA	NBR 10152: 1987			ANSI/ S12.2:2008		
	Valor	Referência	Situação	Valor	Referência	Situação
ANF. 14	35	35-45	Atende	35	25 - 35	Atende
AUD. 1	23	35-45	Não atende	23	25 - 35	Não atende
PG 06	30	35-45	Não atende	30	25 - 35	Atende
ANF. 04	32	35-45	Não atende	32	25 - 35	Atende
ANF. 02	34	35-45	Não atende	34	25 - 35	Atende

FONTE: O autor (2019).

Nota-se que segundo a norma Brasileira NBR 10152:1987 (ABNT, 1987) somente a sala ANF. 14 atende os requisitos da curva NC, deste modo verifica-se que em nenhuma das salas apresentou valores da curva NC no limite superior da norma. Revelando pelo contrário, valores iguais ou menores ao limite inferior. Em contrapartida, ao avaliar a norma Estadunidense ANSI/S12.2:2008 (ANSI/ASA, 2008), somente a sala AUD. 1 ENG. QUI. não atenderia o critério das curvas NC, pelo seu nível de ruído ser muito baixo.

Neste momento, cabe refletir que conforme Cavanaugh, Tocci e Wilkes (2010, p. 95) que a curva NC é importante, pois este parâmetro está associado como um

fator de interferência para a comunicação verbal. O conteúdo energético do ruído de fundo está distribuído ao longo do espectro de frequências, porém este não é necessariamente uniformemente distribuído. Assim, a percepção de sensações audíveis no ouvido humano em condições normais é função da frequência, logo as curvas NC são valores subjetivos associados ao nível de conforto acústico dentro de uma sala. Dessa forma, salas muito silenciosas não geram conforto acústico, apesar de isso contradizer o senso comum, motivo pela qual as salas mostradas no QUADRO 19 foram consideradas não adequadas segundo a NBR 10152:1987 (ABNT, 1987).

Na QUADRO 20 mostram-se os valores do tempo de reverberação – TR, nota-se que o TR de referência segundo a norma brasileira NBR 12179 (ABNT, 1992) é calculado para a frequência de 500 Hz além de considerar a ponderação pelo volume em metros cúbicos. Os volumes das salas medidas podem ser consultados no QUADRO 15, com exceção do ANF. 02 com o volume de 1200 m³, para todas as demais salas adotou-se o volume de 350 m³ para a consulta NBR 12179 (ABNT, 1992).

QUADRO 20 – COMPARAÇÃO DO TR [s] FRENTE ÀS NORMAS

NORMA	NBR 12179: TR – 500 Hz			ANSI/ASA S12.60-2010*: TR – 500 Hz, 1 kHz e 2 kHz			
	Valor	Referência	Situação	Valor	Volume	Referência	Situação
ANF. 14	0,60 s	0,50 s	Não atende	0,52	236,06	0,60 s	Atende
AUD. 1	0,45 s	0,50 s	Atende	0,42	358,11	0,70 s	Atende
PG. 06	0,95 s	0,50 s	Não atende	1,00	355,16	0,70 s	Não atende
ANF. 04	1,57 s	0,80 s	Não atende	1,24	289,27	0,60 s	Não atende
ANF. 02	1,29 s	0,50 s	Não atende	1,10	1200,77	Não especificado	Não especificado

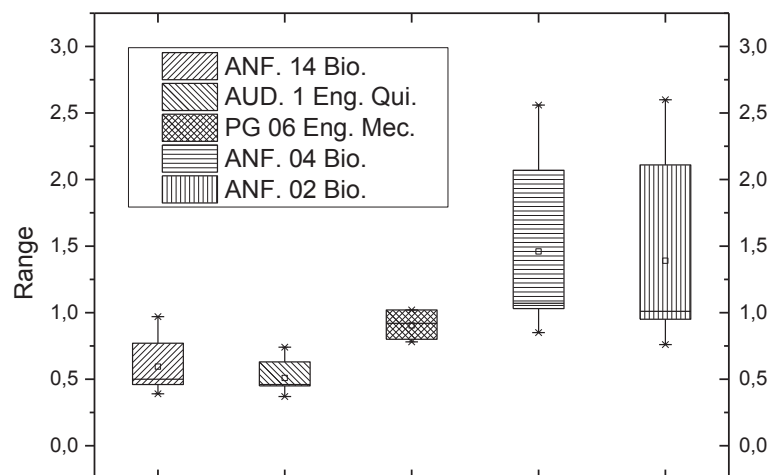
* Calculou-se a média entre a frequências de 500 Hz, 1 kHz e 2 kHz.

FONTE: O autor (2019).

Conforme QUADRO 20, com exceção do AUD. 1 ENG. QUI., todas as salas estão fora dos valores recomendados pela norma NBR 12179 (ABNT, 1992). Verifica-se, a sala do AUD. 1 ENG. QUI., está dentro das normas, pois esta é uma sala de conferência que foi projetada para palestras e atividades voltadas para a aula, embora, mesmo sendo uma sala projetada está encontra-se no limiar inferior de qualidade da norma brasileira. A norma Estadunidense ANSI/ASA S12.60:2010 (ANSI/ASA, 2010) considerou adequada apenas as salas AUD. 1 ENG. QUI. e o ANF. 14. As demais salas não atendem aos requisitos mínimos de conforto acústico avaliado sobre o descritor TR.

Dessa forma, objetivando verificar a distribuição do TR a FIGURA 37 mostra a variabilidade do tempo de reverberação cada sala, conforme foi previamente mostrado no QUADRO 20.

FIGURA 37 – BOX PLOT DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO [s] PARA AS SALAS MEDIDAS



FONTE: O autor (2019).

Por meio da FIGURA 37, observa-se que o tempo de reverberação foi maior nas salas ANF. 02 e ANF. 04, e menor nas salas ANF. 14, AUD. 1 ENG. QUI. e PG. 06. Fato, este se justifica conforme Campbell, Nilsson e Svensson (2015), que a absorção de cada sala interfere fortemente do TR. Neste sentido, as 5 salas estudadas apresentaram distintas distribuições de absorção, conforme mostra o APÊNDICE 2.

Neste trabalho foram medidos tanto o C50 quanto o D50. Porém, cabe salientar que conforme previamente exposto a ISO 3382-2 (ISO, 2008) existe uma relação entre o C50 e o D50, logo a ISO 3282-2 recomenda medir somente um destes descritores. Isto posto a análise de um D50 estende-se ao C50. Esta relação foi mostrada na Eq. (15). O QUADRO 21, mostra-se os resultados para o descritor D50.

QUADRO 21 – COMPARAÇÃO DO D50 FRENTE ÀS NORMAS

SALA	ISO 3382-2:2008 – TR: 500 Hz e 1 kHz			DIN 18041:2004 D50: 125 Hz a 8 kHz			Ansay e Zannin (2016) QUALITATIVO		
	Valor	Referência	Situação	Valor	Referência	Situação	Valor	Ref.	Situação
ANF. 14	79%	30% a 70%	Não atende	76%	≥ 50 %	Atende	76%	> 50 %	Bom
AUD. 1	88%	30% a 70%	Não atende	84%	≥ 50 %	Atende	84%	> 50 %	Bom
PG 06	51%	30% a 70%	Atende	53%	≥ 50 %	Atende	53%	> 50 %	Regular
ANF. 04	46%	30% a 70%	Atende	45%	≥ 50 %	Não atende	45%	> 50 %	Regular
ANF. 02	50%	30% a 70%	Atende	48%	≥ 50 %	Não atende	48%	> 50 %	Regular

FONTE: O autor (2019).

Além disso, na ISO 3382-2 (ISO, 2008) os valores de referência para o D50 são de 30% a 70%. Valores estes, considerados típicos de salas até 25000 m³. A norma alemã DIN 18041:2004 (DIN, 2004) recomenda o C50 \geq 0 dB, que corresponde a D50 \geq 50 %. Campbell, Nilsson e Svensson (2015) mostraram que duas salas idênticas podem apresentar o mesmo tempo de reverberação, porém os demais descritores acústicos podem ser consideravelmente diferentes. Como forma de verificar esta hipótese, no QUADRO 22 apresentaram-se os resultados para os outros descritores Ts e EDT.

QUADRO 22 – COMPARAÇÃO DO Ts e EDT FRENTE A NORMA ISO 3382-1

SALA	ISO 3382-1:2009; Ts: 500 Hz e 1 kHz			ISO 3382-2:2008; EDT: 500 Hz e 1 kHz		
	Valor	Referência	Situação	Valor	Referência	Situação
ANF. 14	32,65 ms	60 ms a 260 ms	Não atende	0,50 s	1,0 s a 3,0 s	Não atende
AUD. 1	22,84 ms	60 ms a 260 ms	Não atende	0,38 s	1,0 s a 3,0 s	Não atende
PG 06	73,52 ms	60 ms a 260 ms	Atende	0,96 s	1,0 s a 3,0 s	Não atende
ANF. 04	92,99 ms	60 ms a 260 ms	Atende	1,31 s	1,0 s a 3,0 s	Atende
ANF. 02	77,9 ms	60 ms a 260 ms	Atende	1,06 s	1,0 s a 3,0 s	Atende

FONTE: O autor (2019).

No QUADRO 22, verificou-se que apenas as salas ANF. 04 e ANF. 02 atenderam simultaneamente os valores típicos do Ts e do EDT, todavia estas duas salas foram as salas com os maiores tempos de reverberação, o que para a fala torna estas salas ruins. Fato este observado na FIGURA 37 e no QUADRO 20, o que mais uma vez, indica sobre a necessidade de se realizar as análises acústicas de forma combinada (BRADLEY; REICH; NORCROSS, 1999; CAMPBELL; NILSSON; SVENSSON, 2015; MASSON et al., 2016).

Por continuidade, é interessante notar que se deve realizar o estudo normativo sob os diversos descritores, pois conforme já exposto por Bradley (2010) cada descritor acústico tem uma interpretação a este associado. Sendo que o TR está associado a uma característica física da sala. Por outro lado, o D50 e o Ts possuem características subjetivas do ouvinte. Da mesma forma, o STI está objetivamente associado à qualidade da fala, medindo a deterioração de um sinal padrão, durante o seu caminho de transmissão entre a fonte e o receptor.

Qualitativamente o STI foi mensurado segundo as normas ISO 9921 (ISO, 2003) e a IEC 60268-16 (IEC, 2011), conforme o QUADRO 23.

QUADRO 23 – COMPARAÇÃO QUALITATIVA DO STI QUALITATIVO PARA AS SALAS

SALA	VALOR MÉDIO	SITUAÇÃO - 9921:2003(E)	SITUAÇÃO - IEC 60268-16:2011(E)
ANF. 14	0,63	Bom	Regular - Bom
AUD. 1	0,63	Bom	Regular - Bom
PG 06	0,56	Regular	Regular - Bom
ANF. 04	0,58	Regular	Regular - Bom
ANF. 02	0,52	Regular	Regular - Bom

FONTE: O autor (2019).

Observa-se que todas as salas estiveram na faixa qualitativa entre regular e bom. As melhores salas, quando avaliados sob o descritor da inteligibilidade STI foram as salas ANF. 14 e o AUD. 1. A pior sala foi o ANF. 02 que apresentou o maior ruído de fundo e também o maior tempo de reverberação, conforme mostraram o QUADRO 20 e FIGURA 37 respectivamente. O QUADRO 24 mostra os valores quantitativos do STI e sua adequação, segundo diversas normas internacionais.

QUADRO 24 – COMPARAÇÃO DO STI FRENTE ÀS NORMAS

SALA		DIN 18041:2004		SFS 5907:2004		BB93:2015		ISO 9921:2003(E)	
	M	Ref.	Situação	Ref.	Situação	Ref.	Situação	Ref.**	Situação
ANF. 14	0,63	≥0,56	Atende	≥0,70	Não atende	≥0,60	Atende	≥0,60	Atende
AUD. 1	0,63	≥0,56	Atende	≥0,70	Não atende	≥0,60	Atende	≥0,60	Atende
PG 06	0,56	≥0,56	Atende	≥0,70	Não atende	≥0,60	Não atende	≥0,60	Não atende
ANF. 04	0,58	≥0,56	Atende	≥0,70	Não atende	≥0,60	Não atende	≥0,60	Não atende
ANF. 02	0,52	≥0,56	Não atende	≥0,70*	Não atende	≥0,60	Não atende	≥0,60	Não atende

*Classe C, as demais classes são A e B $\geq 0,80$.

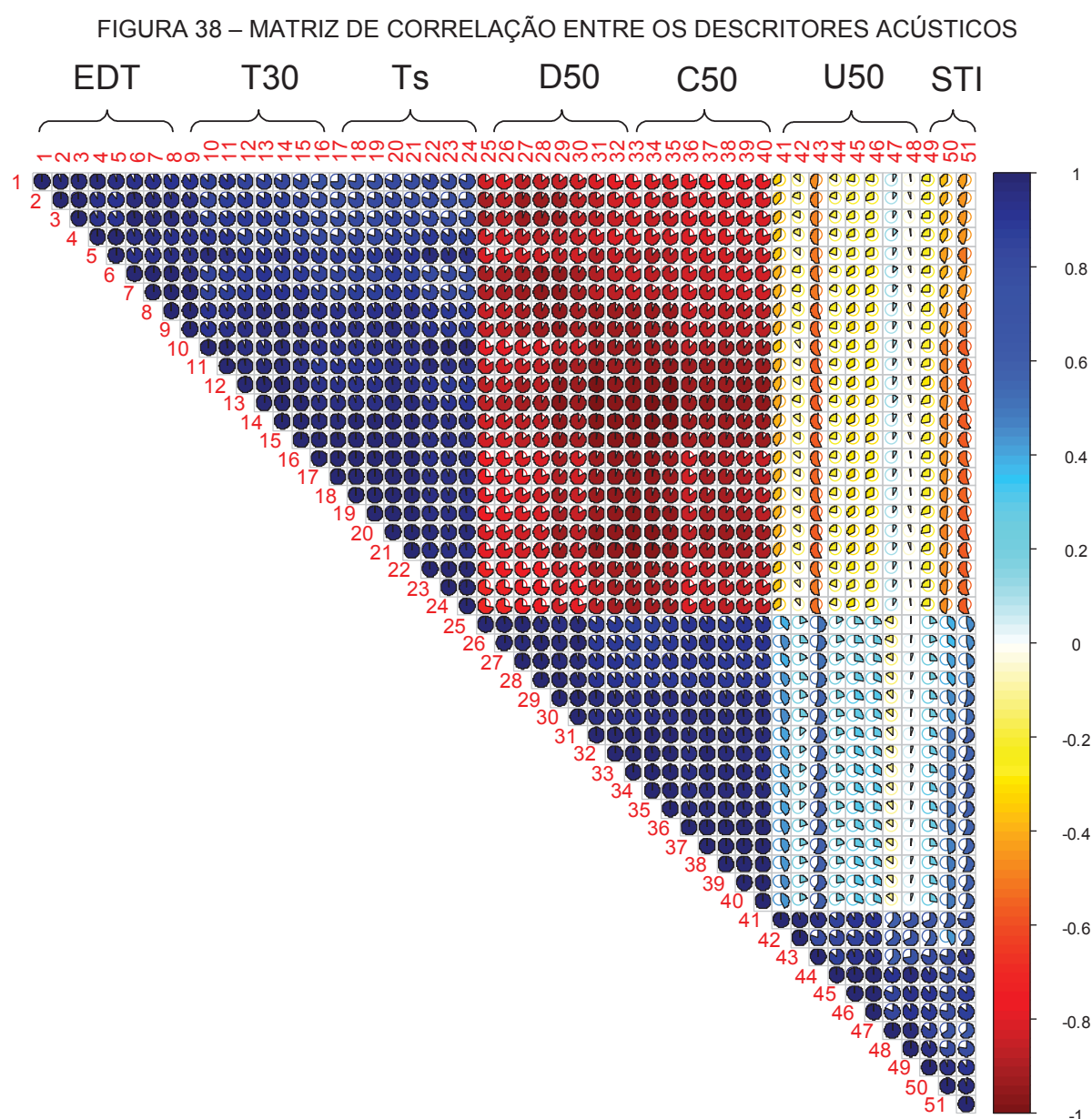
**Correspondente a condição de Comunicação de Pessoa para Pessoa, Nível razoável (Fair). Tabela 1 da ISO 9921:2003(E). Para o *Fair rating* o STI vale entre 0,45 a 0,60, o que IEC 60268-16:2011(E) corresponde ao STI de 0,60. Na TABELA 6 foram mostradas estas relações.

FONTE: O autor (2019).

A norma Finlandesa SFS 5907:2004 (SFS, 2004) estabelece os limites mais restritivos para o STI, seguidos na Inglaterra e posteriormente da Alemanha. Segundo a SFS 5907:2004 (SFS, 2004) nenhuma das salas estaria com o STI aceitável para a finalidade de sala de aula. Por outro lado, o segundo a DIN 18041:2004 (DIN, 2004), somente a sala ANF. 02 não estaria com o STI aceitável, e para a BB93 (DFE, 2015) e a ISO 9921 (ISO, 2003) somente as salas ANF. 14 e AUD. 1 cumpririam os requisitos mínimos.

6.2 ANÁLISES DE CORRELAÇÃO ENTRE OS DESCRITORES

Este trabalho teve como objetivo não somente fazer um estudo sobre a adequação acústica das salas, mas também identificar as possíveis correlações entre estes descritores acústicos estudados. Deste modo, para que seja possível identificar redundâncias entre os descritores, tornando a análise da adequação acústica mais direta e parcimoniosa. Dessa forma, na FIGURA 38, mostra-se a matriz de correlação entre os descritores EDT, T30, Ts, D50, C50, U50 e STI.



FONTE: O autor (2019).

A matriz de correlação mostrada na FIGURA 38 considera todos descritores simulados, sendo que os descritores EDT, T30, Ts, D50, C50, U50 são multibandas, variando suas respostas entre 63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1k Hz, 2 kHz, 4 kHz e 8 kHz e o STI como descritor representado por apenas um valor sobre todas as bandas de frequência, no qual foram simulados os STI masculino, STI feminino e o STI sem ponderação de sexo. A equivalência entre os indexadores (números) mostrados na FIGURA 38 e os descritores EDT, T30, Ts, D50, C50, U50 são mostradas no QUADRO 25.

QUADRO 25 – INDEXADORES DOS DESCRITORES MOSTRADOS NA FIGURA 38

DESCRITOR	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
EDT	1	2	3	4	5	6	7	8
T30	9	10	11	12	13	14	15	16
Ts	17	18	19	20	21	22	23	24
D50	25	26	27	28	29	30	31	32
C50	33	34	35	36	37	38	39	40
U50	41	42	43	44	45	46	47	48

FONTE: O autor (2019).

Foram consideradas 51 variáveis de resposta, com 80 amostras. As amostras são correspondentes às simulações das salas, sendo que para cada sala original foram simulados 16 novos cenários, totalizando para as 5 salas originais as 80 amostras.

Analisando os resultados da FIGURA 38, tem-se:

- inicialmente obtiveram-se três grupos altamente correlacionados, sendo o primeiro (EDT, T30 e Ts), o segundo (C50 e D50) e o terceiro (U50 e STI); Estes grupos são identificados pelas amostras em azul-escuro;
- o primeiro grupo (EDT, T30 e Ts) correlacionou-se negativamente com o segundo (D50 e C50), obtendo correlação negativa: R^2 entre [-0,8 e -1,0].
- o primeiro grupo (EDT, T30 e Ts) correlacionou-se fracamente com o terceiro (U50 e STI), obtendo correlação negativa: R^2 entre [0 e -0,40].
- o segundo grupo (D50 e C50) correlacionou-se fracamente com o terceiro (U50 e STI), obtendo correlação majoritariamente positiva entre: R^2 entre [0,40 e 1,0].

Por meio das prévias análises, observa-se que a correlação entre o primeiro grupo (EDT, T30 e Ts) é verificada na literatura, uma vez que estes descritores foram repetidos vezes determinados com altamente correlacionadas positivamente. Fato este, observado na Tabela A.1 da ISO 3382-1:2009, que agrupa segundo os aspectos de percepção da reverberação o EDT, T30. Entretanto, a ISO 3382-1 (ISO, 2009) considera o Ts como a percepção do ouvinte sobre a claridade do som. Conforme Bradley (2010, p. 13) estas são classificações subjetivas que ainda requerem mais estudos.

Sobre o segundo grupo (C50 e D50), estes estão matematicamente relacionados. Portanto, a forte correlação entre estes dois descritores já é bastante consolidada na literatura, sendo presente na ISO 3382-1 (ISO, 2009) e na DIN 18041:2004 (DIN, 2004) a demonstração destas igualdades. Fato interessante observa-se no trabalho realizado por Ansay e Zannin (2016), que reavaliaram esta relação para tornar as interpretações entre o C50 e D50 mais diretas. Os pesquisadores propuseram somente avaliar o D50, que está na escala decimal, o que facilitaria estabelecer conclusões sobre a qualidade acústica mais facilmente do que o C50, que é logarítmico. Este estudo foi feito por meio da conversão entre os dados mostrados na TABELA 6, originalmente proposto por Marshall (1994).

Neste momento, discutem-se as correlações cruzadas entre os grupos 1, 2 e 3 identificados na FIGURA 38. Inicialmente na revisão da literatura, ver seção 3.4, estas correlações foram trabalhadas. A discussão se os resultados obtidos neste trabalho estão de acordo com a literatura é mostrada a seguir, principalmente ao avaliar as correlações dos descritores frente ao STI:

- a) na literatura já foi demonstrada a correlação negativa que foi verificada neste trabalho, entre o tempo de reverberação (TR ou T30) e o STI. Ou seja, com o aumento do TR verificou-se um decréscimo sobre a inteligibilidade – STI. No QUADRO 3, alguns destes modelos foram apresentados. As demais relações podem ser consultadas em Bistafa e Bradley (2000), Tang e Yeung (2004), Rennies et al., 2014, Escobar e Morillas (2015), Nowoświat e Olechowska (2016).
- b) as correlações entre EDT e Ts mostraram-se na literatura como: o EDT correlaciona-se diretamente (positivamente) com o TR, porém o TR relaciona-se apenas sobre uma característica física da sala (resultado proveniente da resposta impulsiva, ou seja, uma função de resposta no

domínio do tempo). O EDT por outro lado, está associado subjetivamente a percepção do campo reverberante. Portanto, de forma direta pode-se afirmar que o aumento do EDT, TR e assim como o do Ts impactam negativamente sobre o STI. Isto posto, os resultados obtidos neste trabalho corroboram em alinhamento direto com os resultados de Cerdá et al. (2009) e Nestoras e Dance (2013).

- c) a correlação entre o U50 e o STI mantém positivamente correlacionada. Uma vez que, o U50 foi desenvolvido visando estabelecer um melhor balanço entre a energia das primeiras reflexões, ou seja, o som direito frente as energias tardias, reflexões de campo reverberante. Neste trabalho o U50 foi o único descritor que se correlacionou positivamente com o STI, com o R^2 entre 0,8 e 1,0. Esta correlação entre o U50 e STI foi explorada na TABELA 7. As demais podem ser vistas em Bradley, Reich e Norcross (1999, p. 1824), Bradley, Sato e Picard (2003), Nijs e Rychtáriková (2011) e Sato, Morimoto e Wada (2012, p. 4601).

Portanto, verificou-se que as correlações mostradas na literatura foram todas observadas neste trabalho. Notou-se que os descritores U50 e D50 foram os descritores mais correlacionados com a inteligibilidade (STI). Salienta-se que foi necessário consultar diversos trabalhos na literatura para sintetizar as correlações, sendo que a metodologia proposta nesta pesquisa foi identificada todas estas correlações, sem, portanto, necessitando realizar um estudo para cada descritor em separado.

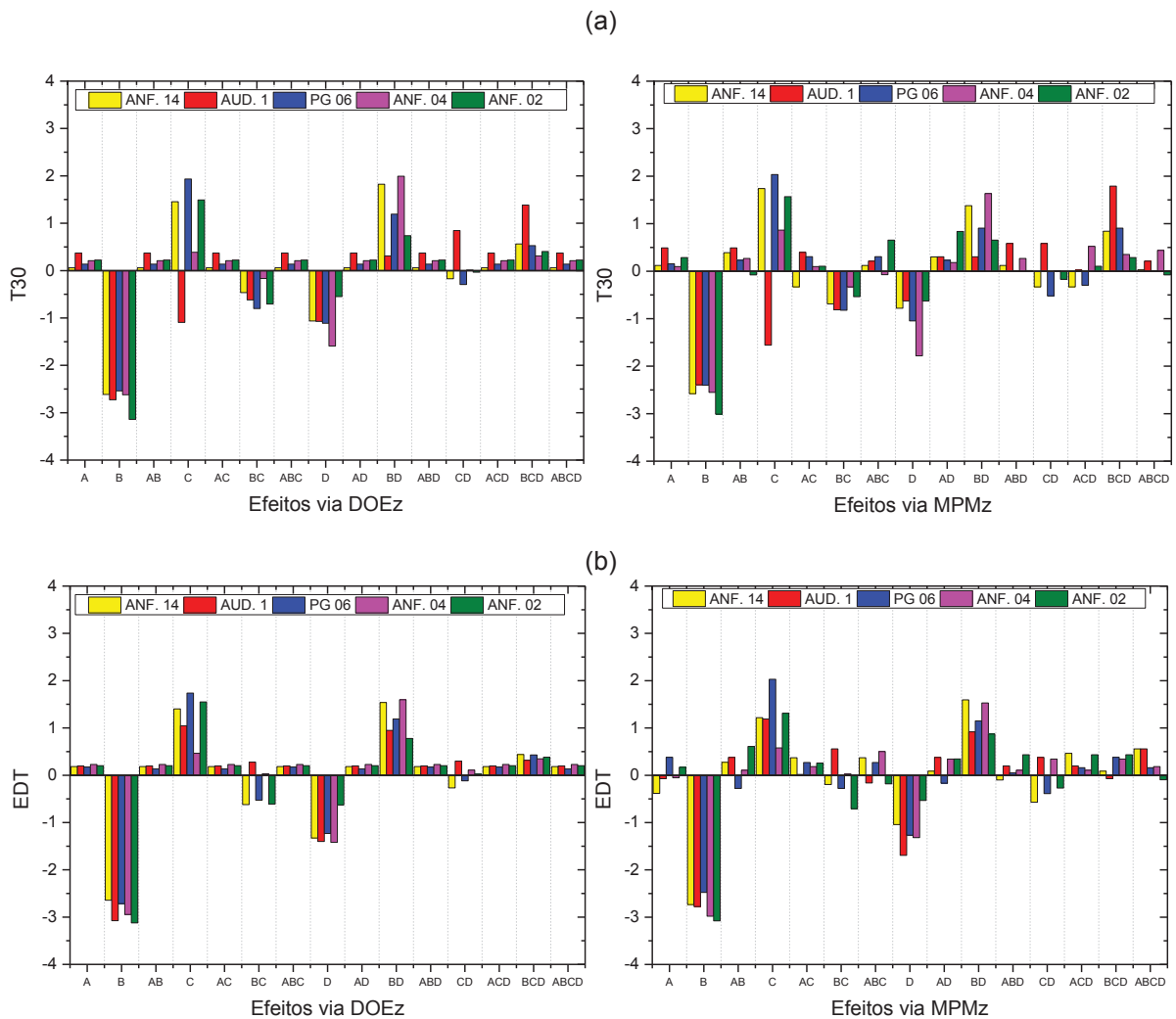
6.3 ANÁLISES DOS EFEITOS

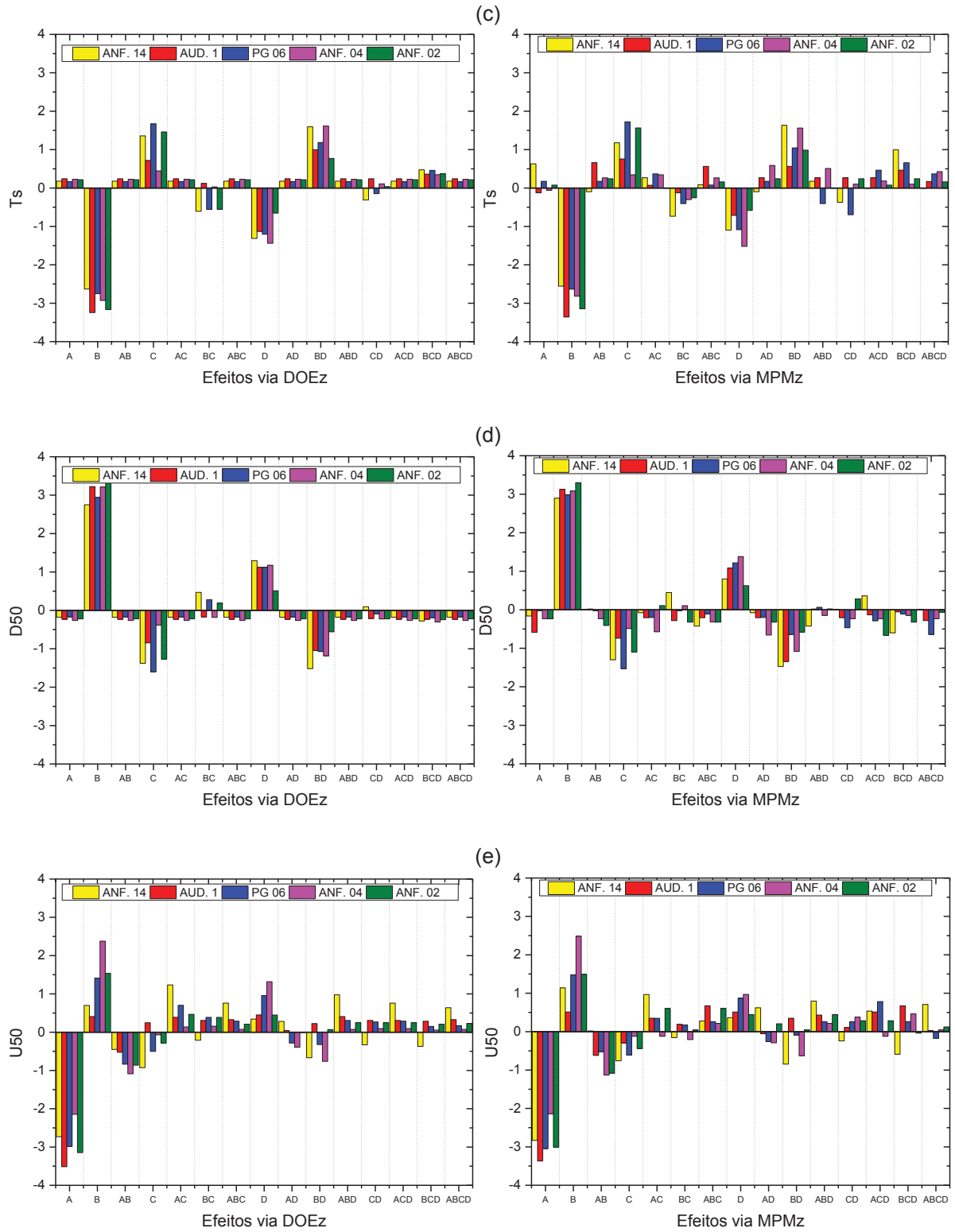
As análises dos efeitos construtivos e das condições acústicas das salas interferem sobre cada descritor acústico numa configuração diferente. Devido a isto foram aplicadas o Planejamento Fatorial de Experimentos e as Redes Neurais Artificiais para mensurar estes efeitos. Conforme mostrado na seção 5.3.3, comprovou-se que a abordagem das redes neurais e o planejamento fatorial revelaram os mesmos postos de significância para os fatores mais significantes, resultado este sintetizado por meio da FIGURA 36. Além disso, como evidenciado no QUADRO 15, e os resultados dos descritores acústicos, as salas apresentaram

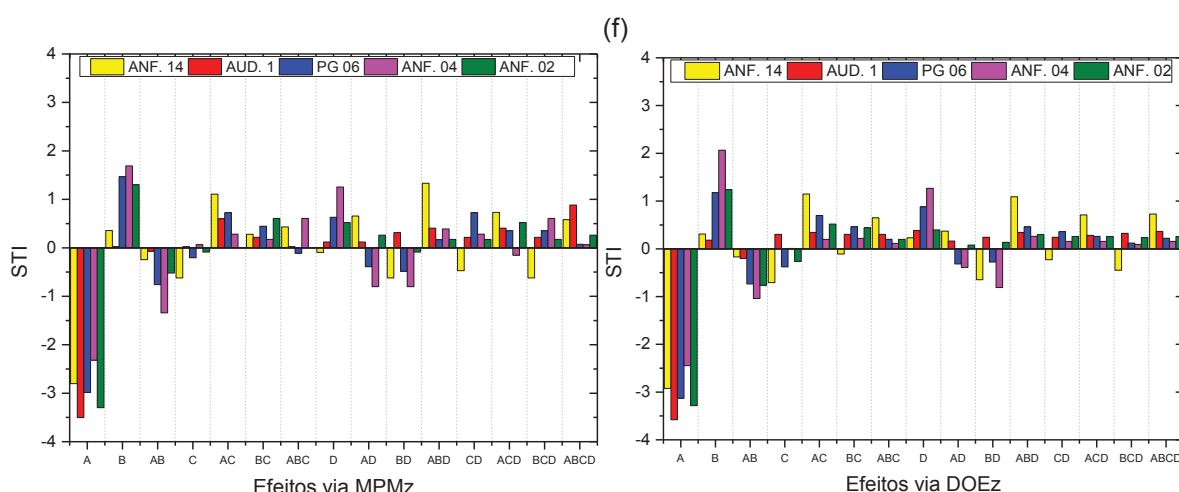
elevada variabilidade estatística caracterizada pela relação entre o desvio padrão e a média.

Sendo assim, a hipótese elencada por Montgomery (2013), que recomendava a realização do Planejamento Fatorial em condições mais diferenciadas possíveis foi atendida. Em geral, mais de 95% de toda a variância, foi explicada com o uso de apenas um componente principal. Com este arcabouço, os resultados foram graficamente condensados para cada sala, a FIGURA 39 mostra os descritores individualmente e avalia-se como estes evoluíram nas 5 salas estudadas.

FIGURA 39 – COMPARAÇÃO DOS EFEITOS POR DESCRITOR VIA DOE-z E MPM-z







FONTE: O autor (2019).

Previamente, plotou-se na FIGURA 36 num gráfico de barras os efeitos “A”, “B”, “C” e “D” e com suas respectivas interações para cada sala individualmente. Nesta verificou-se uniformidade, motivo pelo qual as discussões foram apresentadas de forma global para as salas.

Nota-se que os dados da FIGURA 36 e da FIGURA 39 são os mesmos, sendo alterada apenas a ordem de representação. Na FIGURA 39, verifica-se visualmente que de fato os descritores EDT, T30 e Ts apresentaram elevada similaridade. Enquanto, os descritores U50 e STI também apresentaram entre si. Consequentemente, verifica-se mais uma vez a formação de grupos, demonstrando que os descritores se mantêm correlacionados e que os efeitos nos grupos dos descritores são os mesmos. Os grupos são os mesmos determinados nas análises de correlação, ou seja: o primeiro grupo FIGURA 39(a, b, c) (EDT, T30 e Ts), o segundo grupo FIGURA 39(d) (C50 e D50) e o terceiro grupo FIGURA 39(e, f) (U50 e STI).

Com base na FIGURA 39(a, b, c) nota-se formação de certo padrão, para os descritores EDT, T30 e Ts para os quais, o fator mais significativo em módulo foi o B. Nota-se que, com o aumento da absorção B de -1 a +1, o T30 diminui significativamente. Além disso, neste grupo entre o EDT, T30 e Ts verificou-se que o fator ruído de fundo (A) não produziu efeitos significantes.

Analogamente, notou-se que, tanto a significância no DOE e no MPM identificaram um acréscimo D50 (segundo grupo) FIGURA 39(d) com o aumento do coeficiente de absorção sonora do teto de -1 a +1. Uma vez que, o D50 é notadamente associado à inteligibilidade da fala, estes resultados mostram-se promissores.

Porquanto, ao contrário dos descritores T30, EDT e Ts, o aumento da absorção não indicou diretamente um aumento imediato na inteligibilidade.

O terceiro grupo identificado foi composto pelos descritores U50 e STI, (ver FIGURA 39(e,f)). Nestes o aumento do ruído de fundo de -1 a +1 provocou a diminuição da inteligibilidade, enquanto, a absorção sozinha não foi um efeito de proeminência.

Com os gráficos das FIGURA 36 e FIGURA 39 e com auxílio do QUADRO 26, elencou-se os postos de significância dos efeitos. Para cada sala foram destacados os 4 principais efeitos, estes apresentam um sinal de (+) indicando um aumento no descritor, o sinal de (-) indica o decréscimo no descritor, na medida que, o efeito varia de -1 a +1.

QUADRO 26 – EFEITOS DA CONDIÇÃO ACÚSTICA SOBRE OS DESCRITORES

POSTO	1º GRUPO						2º GRUPO		3º GRUPO			
	EDT		T30		Ts		D50		U50		STI	
1 °	(-)B	2,902	(-)B	2,728	(-)B	2,944	(+)B	3,096	(-)A	2,906	(-)A	3,072
2 °	(+)C	1,242	(+)BD	1,21	(+)BD	1,236	(-)C	1,096	(+)B	1,288	(+)B	0,996
3 °	(+)BD	1,212	(-)D	1,076	(-)D	1,146	(-)BD	1,074	(-)AB	0,754	(+)D	0,632
4 °	(-)D	1,202	(+)C	0,834	(+)C	1,134	(+)D	1,044	(+)D	0,704	(-)AB	0,582
	Interações sem significância											
5 °	BCD	0,384	BCD	0,636	BCD	0,402	BCD	0,248	AC	0,588	AC	0,582
6 °	BC	0,29	BC	0,552	BC	0,316	A	0,212	ABD	0,404	ABD	0,49
7 °	A	0,196	A	0,2	A	0,208	AB	0,212	ACD	0,342	ABCD	0,346
8 °	ABC	0,196	AB	0,2	AB	0,208	AC	0,212	ABC	0,332	ACD	0,334
9 °	ABD	0,196	AC	0,2	AC	0,208	ABC	0,212	C	0,308	ABC	0,292
10 °	ACD	0,196	ABC	0,2	ABC	0,208	AD	0,212	BD	0,29	BD	0,272
11 °	AB	0,19	AD	0,2	AD	0,208	ABD	0,212	ABCD	0,288	BC	0,262
12 °	AC	0,19	ABD	0,2	ABD	0,208	ACD	0,212	BC	0,208	C	0,208
13 °	AD	0,19	ACD	0,2	ACD	0,208	ABCD	0,212	CD	0,12	CD	0,158
14 °	ABCD	0,19	ABCD	0,2	ABCD	0,208	CD	0,128	AD	0,072	BCD	0,064
15 °	CD	0,01	CD	0,074	CD	0,014	BC	0,118	BCD	0,066	AD	0,02

FONTE: O autor (2019).

O posto de significância foi considerado com o valor médio do módulo das contribuições para todas as 5 salas estudadas. Verifica-se que conforme as discussões sobre as correlações, os descritores se agruparam em três grandes grupos. Mostrando dessa forma, que em cada grupo estes descritores respondem da mesma forma.

6.3.1 Comparação do posto de significância dos efeitos frente a literatura

Nesta seção os principais efeitos foram discutidos em tópicos e comparados com os resultados presentes na revisão da literatura, ver seção 3.3. Mais uma vez, devido a verificação de correlações as análises dos efeitos foram divididas por grupos:

- a) no primeiro grupo (EDT, T30 e Ts), verifica-se na literatura que os fatores mais importantes foram: (-)B, (+)BD, (-)D e (+)C. Verifica-se que a absorção sonora da sala codificada para o fator B, afeta majoritariamente na diminuição do T30. Sendo que o aumento na absorção implica diretamente a diminuição nos EDT, T30 e Ts. Fato este foi verificado satisfatoriamente na literatura (BERANEK, 2006, CAVANAUGH; TOCCI E WILKES; 2010, PASSERO; ZANNIN; 2010).
- b) o segundo grupo (C50, D50) responderam em termos de magnitude como: (+)B, (-)C, (-)BD e (+)D. Enquanto que no primeiro grupo, o fator B foi o mais significativo no aumento do (D50). Porém deve ser observado que quanto maior o D50 melhor será a inteligibilidade, conforme a relação verificada por outros trabalhos (BRADLEY; SATO; PICARD, 2003; ROMAN; WOODRUFF, 2013; ARWEILER; BUCHHOLZ, 2011).
- c) observa-se que no posto de significância do QUADRO 26, para o terceiro grupo (U50 e STI) o 1º efeito com maior impacto sobre a inteligibilidade foi o ruído de fundo, codificado como o efeito (A), o 2º efeito mais significativo foi a absorção sonora (B), indicando que um aumento na absorção sonora e consequentemente a diminuição no tempo de reverberação impacta positivamente sobre o STI. A relação de importância entre o efeito A sobre o B foi aproximadamente 3 vezes.

Avaliando o item (c), o ruído de fundo explica a maior parte da variação da inteligibilidade dentro das salas, isso para 5 salas com grande diferenciação. Este resultado encontrado diversos trabalhos: Sakamoto et al. (2004), Brachmanski (2006), Nijs e Rychtáriková (2011), Sommerhoff e Rosas (2011); Sato, Morimoto e Wada (2012); Rennies et al. (2014).

6.3.2 Compêndio das análises sobre a qualidade acústica das salas

Nos demais estudos realizados em salas de aula da Universidade Federal do Paraná (UFPR), no campus do Centro Politécnico, também foram verificados que a maioria das salas se encontra fora dos valores ótimos estipulados pela legislação (FERREIRA, 2006; HERRMANN, 2018).

Zannin, Ferreira e Sant'ana (2009) mediram o TR e simularam o STI, em cenários simulados aplicando o software ODEON versão 9.0. As medições foram realizadas em 8 salas da Universidade Federal do Paraná, construídas em prédios em diferentes décadas, 1963 e 2000. Os resultados indicaram grande influência das características construtivas, que interferem diretamente no TR e no STI simulados. Em geral o STI ficou entre 0,73 e 0,76 ou qualitativamente “boa” após melhorias, o que antes era na faixa de 0,39 a 49, considerado “ruim” segundo a IEC 602068-16 (IEC, 2011).

A não adequação acústica das salas de aula universitárias não é um fenômeno exclusivamente da UFPR, diversos trabalhos demonstram uma tendência internacional sob condições acústicas aquém dos níveis mínimos de qualidade (BISTAFA; BRADLEY, 2001; NESTORAS; DANCE, 2013; RABELO et al., 2014; SALA; RANTALA, 2016; LONGONI et al., 2016; SECCHI et al., 2017; DONGRE et al., 2017).

No que tange sobre o STI está situação é ainda mais preocupante, na medida que, devido à complexidade das medições e do custo da instrumentação envolvida, não existem muitas referências, principalmente a nível Brasil.

Augustyńska et al. (2010) e colaboradores, realizaram um estudo em escolas da Polônia de nível infantil, com a aplicação de questionários para 187 professores de 3 escolas, construídas 1973, 1993 e 2003, nas quais ainda foram realizadas medições de STI e do TR. Os autores constataram que cerca de 90% dos professores consideraram o ruído como o fator mais interferia na qualidade de suas aulas. Além disso, determinou-se experimentalmente que a qualidade acústica das salas era ruim, com o TR variando de 0,8 a 1,7 s e com o STI < 0,6 em 50% de todas as salas. O LAeq médio entre 58 dB a 80 dB. Estes resultados justificavam um processo de ensino aprendizagem ruim, conforme as respostas dos professores.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1 CONCLUSÕES

Este trabalho teve os seguintes objetivos: (i) avaliar acusticamente 5 salas de aula da Universidade Federal do Paraná, Campus Centro Politécnico, (ii) realizar um estudo de correlação entre os descritores acústicos e (iii) posteriormente proceder com uma análise de significância para verificar como outras condições das salas interferem em cada um dos descritores. Para a realização do estudo de significância, verificou-se que os resultados foram os mesmos aplicando-se as Redes Neurais Artificiais e o Planejamento Fatorial de Experimentos. Para cada um dos objetivos, foram elencadas as conclusões obtidas, quais sejam:

(i) a qualidade acústica das salas foi verificada aplicando-se os descritores TR - tempo de reverberação; STI - Índice de Transmissão da Fala; D50 - Definição e NC - Curvas de Ruído. Os resultados mostraram que somente a sala AUD. 1 do prédio de Engenharia Química atingiu os requisitos mínimos, simultaneamente, para o TR e STI. As demais salas estavam fora dos limites estabelecidos pelas normas. Isso demonstra que a Universidade Federal do Paraná deve dar mais atenção ao projeto acústico de suas salas. Com esta qualidade acústica deficitária, os professores e alunos podem estar sujeitos a altos níveis de estresse e aumento da pressão arterial, além da relação ensino aprendizagem ser prejudicada.

(ii) quanto ao estudo das correlações, mostrou que dentre os descritores EDT, T30, Ts, D50, C50, U50 e STI manifestaram-se fortes correlações. Foi possível concluir que este conjunto de descritores poderia ser estratificados em 3 subgrupos, de acordo com suas correlações diretas. Elas são as seguintes: primeiro grupo (EDT, T30 e Ts); segundo grupo (C50, D50) e terceiro grupo (U50 e STI). Com isto, verificou que as correlações agruparam os descritores de acordo com suas finalidades. Ou seja, no primeiro grupo identificado, ficam os descritores associados ao caráter de reverberação, no segundo grupo, ao balanço energético, entre o som direto e o atrasado, e no terceiro grupo, com a inteligibilidade. Estes resultados concordam com a literatura.

Além disso, através da matriz de correlação, verificou-se que o aumento do tempo de reverberação diminui a inteligibilidade da fala nestas salas de aula. Este resultado foi sucessivamente encontrado na literatura. O diferencial deste presente

trabalho foi ter determinado esta relação por meio da simulação de 80 salas virtuais e estabelecer estes resultados de forma direta e combinada.

Deve-se, no entanto, verificar que o efeito do D50 não foi diretamente agrupado com os grupos dos descritores associados à inteligibilidade, ou seja, o STI e o U50. Embora alguns trabalhos tragam altas correlações entre o D50 e o STI, constatou-se que o D50 correlaciona mais com os indicadores de inteligibilidade do que com os indicadores do tempo de reverberação. Todavia esta correlação não foi alta.

O U50 é considerado um descritor de inteligibilidade, devido seu efeito subjetivo, sobretudo na percepção do balanço entre as primeiras reflexões (benéficas à inteligibilidade) frente a reflexões tardias (prejudiciais à inteligibilidade). A correlação entre o STI e U50 foi perfeitamente verificada.

(iii) conclui-se que o posto de significância determinado neste trabalho se encontra alinhado com os trabalhos na literatura. Mais uma vez, a significância dos descritores frente aos fatores A: Ruído, B: Absorção do Teto, C: Confinamento e D: Audiência, somadas com as suas interações, puderam ser agrupadas nos 3 mesmos subgrupos apresentados nas análises de correlação.

Conclui-se dessa forma que, a absorção, fator (B), interfere mais nos descritores de reverberação (1º e 2º grupos) e o ruído de fundo, fator (A), interfere fortemente sobre o STI. O fator C foi o fator que menos interferiu nos descritores acústicos em geral. As interações entre o ruído de fundo e a absorção foram as condições que mais interferem para provocar significativas variações nos descritores acústicos. Os efeitos de interação de terceira ordem e quarta ordem (combinados) não possuem significância relevante sobre as salas estudadas.

Adicionalmente, mostrou-se que o D50 responde da mesma forma que o EDT, Ts e T30 para condições acústicas da sala, verificando apenas que, quando se aumenta a absorção da sala, diminui-se o valor do TR e aumenta-se o D50.

Finalmente, com este trabalho demonstrou-se que para o planejamento fatorial do tipo 2^4 não foi observado o efeito das não linearidades no sistema, uma vez que os resultados dos postos de significância das redes neurais e da regressão linear múltipla revelaram os mesmos valores.

7.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho, demonstrou-se que a acústica de salas é um campo que permeia entre o balanço da objetividade das medições e da subjetividade das interpretações dos valores nominais dos descritores acústicos. Com isto, muitas vezes, a percepção psicoacústica tem uma ponderação muito importante na interpretação dos resultados. Um exemplo pôde ser verificado neste trabalho, da não adequação das salas estudadas, por estas apresentarem ruído de fundo, curva NC, muito baixo, sendo um fato que contradiz o senso comum.

Portanto, visando adentrar neste nicho, recomenda-se o desenvolvimento de estudos para determinar a validade do uso do STI para o idioma português. Originalmente, o STI foi convalidado para o idioma inglês, por meio de testes de inteligibilidade subjetivos, aplicando questionários ou testes de palavras. A verificação da correlação entre o STI com os testes subjetivos de inteligibilidade realizados com o idioma português (Br) ainda não foram feitas, necessitando, portanto, de mais estudos.

Adicionalmente, recomenda-se realizar testes subjetivos correlacionando os descritores EDT e D50 com a inteligibilidade, uma vez que, na literatura, alguns trabalhos apresentam recomendações de utilizar estes dois como descritores de inteligibilidade, e não de reverberação somente. Todavia, verificou-se baixa correlação destas frentes ao STI ou ao U50.

Finalmente, foi possível estabelecer quantitativamente que, para o STI, o ruído de fundo possui um fator de significância que é cerca de 3 vezes maior que a absorção sonora da sala, que foi o segundo fator do posto. Portanto, recomenda-se realizar mais estudos com medições experimentais em laboratórios, para verificar se esta relação se mantém para outras salas, com diferentes geometrias e arranjos de distribuição da absorção sonora.

REFERÊNCIAS

ABDI, H.; WILLIAMS, L. J. Principal component analysis. **Wiley interdisciplinary reviews: computational statistics**, v. 2, n. 4, p. 433-459, 2010.

AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE (ANSI). **ANSI/ASA S12.2-2008**: Criteria for Evaluating Room Noise. Acoustic Society of America, Melville, NY 2008.

AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE (ANSI). **ANSI/ASA S12.60-2010/PART 1**: Acoustical Performance criteria, Design Requirements, and guidelines for Schools, Part 1: Permanent Schools. Acoustic Society of America, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM C423-17**: Standard Test Method for Sound Absorption and Sound Absorption Coefficients by the Reverberation Room Method, ASTM International, West Conshohocken, United States of America 2017.

ANSAY, S.; ZANNIN, P. H. T. Using the Parameters of Definition, D50, and Reverberation Time, RT, to Investigate the Acoustic Quality of Classrooms. **Canadian Acoustics**, v. 44, n. 4, p. 6-11, 2016.

ARAU-P. H., An improved reverberation formula, **Acustica**, 65, 163–180, 1988.

ARWEILER, I.; BUCHHOLZ, J. M. The influence of spectral characteristics of early reflections on speech intelligibility. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 130, n. 2, p. 996-1005, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10152**: Acústica — Níveis de pressão sonora em ambientes internos a edificações. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12179**: Tratamento acústico em recintos fechados - Procedimento. Rio de Janeiro, 1992.

ASTOLFI, A.; BOTTALICO, P.; BARBATO, G. Subjective and objective speech intelligibility investigations in primary school classrooms. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 131, n. 1, p. 247-257, 2012.

ASTOLFI, A.; PELLEREY, F. Subjective and objective assessment of acoustical and overall environmental quality in secondary school classrooms. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 123, n. 1, p. 163-173, 2008.

AUGER, N. et al. Environmental noise pollution and risk of preeclampsia. **Environmental Pollution**, v. 239, p. 599-606, 2018.

AUGUSTYŃSKA, D., KACZMARSKA, A., MIKULSKI, W., RADOSZ, J. Assessment of teachers' exposure to noise in selected primary schools. **Archives of Acoustics**, v. 35, n. 4, p. 521-542, 2010.

BEHAR, A. et al. Noise exposure of music teachers. **Journal of Occupational and Environmental Hygiene**, v. 1, n. 4, p. 243-247, 2004.

BERANEK, L. L. Airplane quieting II specification of acceptable noise levels. **Trans. Amer. Soc. Mech. Engrs**, v. 69, p. 97-100, 1947.

BERANEK, L. L. Analysis of Sabine and Eyring equations and their application to concert hall audience and chair absorption. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 120, n. 3, p. 1399-1410, 2006.

BISTAFA, S. R.; BRADLEY, J. S. Predicting speech metrics in a simulated classroom with varied sound absorption. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 109, n. 4, p. 1474-1482, 2001.

BISTAFA, S. R.; BRADLEY, J. S. Reverberation time and maximum background-noise level for classrooms from a comparative study of speech intelligibility metrics. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 107, n. 2, p. 861-875, 2000.

BRACHMANSKI, S. Experimental comparison between speech transmission index (STI) and mean opinion scores (MOS) in rooms. **Archives of Acoustics**, v. 31, n. 4, p. 171-176, 2006.

BRADLEY, J. S. Predictors of speech intelligibility in rooms. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 80, n. 3, p. 837-845, 1986.

BRADLEY, J. S. Review of objective room acoustics measures and future need, **Proceedings of the International Symposium on Room Acoustics**, Melbourne, Australia, p. 1-7. 2010.

BRADLEY, J. S.; REICH, R. D.; NORCROSS, S. G. On the combined effects of signal-to-noise ratio and room acoustics on speech intelligibility. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 106, n. 4, p. 1820-1828, 1999.

BRADLEY, J. S.; SATO, H.; PICARD, M. On the importance of early reflections for speech in rooms. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 113, n. 6, p. 3233-3244, 2003.

CAMPBELL, C.; NILSSON, E.; SVENSSON, C. The same reverberation time in two identical rooms does not necessarily mean the same levels of speech clarity and sound levels when we look at impact of different ceiling and wall absorbers. **Energy Procedia**, v. 78, p. 1635-1640, 2015.

CARVALHO, A. P. O. Relations between rapid speech transmission index (RASTI) and other acoustical and architectural measures in churches. **Applied Acoustics**, v. 58, n. 1, p. 33-49, 1999.

CAVANAUGH, W. J.; TOCCI, Gregory C.; WILKES, J. A. (Ed.). **Architectural acoustics: Principles and practice**. John Wiley & Sons, 2010.

CERDÁ, S. et al. Room acoustical parameters: A factor analysis approach. **Applied Acoustics**, v. 70, n. 1, p. 97-109, 2009.

CHOI, Y.-J. Predicting classroom acoustical parameters for occupied conditions from unoccupied data. **Applied Acoustics**, v. 127, p. 89-94, 2017a.

CHOI, Y.-J. Comparison of Two Types of Combined Measures, STI and U50, for Predicting Speech Intelligibility in Classrooms. **Archives of Acoustics**, v. 42, n. 3, p. 527-532, 2017b.

CHRISTENSEN, C. L. ODEON, **Room Acoustics Software version 11 manual**. URL: www.odeon.dk. 2013.

DEPARTMENT FOR EDUCATION (DFE), **BB93: Building Bulletin 93 - Acoustic design of schools: performance standards**. London. 2015.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN) - DIN 18041.2004. **Hörsamkeit in kleinen bis mittelgroßen Räumen**. [Acoustical quality in small to medium-sized rooms] Germany, Berlin, Beuth Verlag, 2004.

DO NASCIMENTO, E. O.; DE OLIVEIRA, L. N. Sensitivity analysis of cutting force on milling process using factorial experimental planning and artificial neural networks. **IEEE Latin America Transactions**, v. 14, n. 12, p. 4811-4820, 2016.

DONGRE, A. R. et al. Acoustical characteristics of classrooms of tropical climate. **Applied Acoustics**, v. 121, p. 46-55, 2017.

ESCOBAR, V. G.; MORILLAS, J. M B. Analysis of intelligibility and reverberation time recommendations in educational rooms. **Applied Acoustics**, v. 96, p. 1-10, 2015.

EUROPEAN AGENCY FOR SAFETY AND HEALTH AT WORK (EU-OSHA). OSH in the school curriculum: requirements and activities in the EU member states. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities. 2009. Disponível em: < <https://osha.europa.eu/en/publications/reports/TE3008521ENC>>. Acesso: 21 Jun de 2018.

FASOLD, W.; VERES, E. **Schallschutz und Raumakustik in der praxis. Planungsbeispiele und konstruktive lösungen**. Muss-medien GmbH, Berlin, 2003.

FERREIRA, A.M.C. **Avaliação do Conforto Acústico em salas de Aula: Estudo de Caso na Universidade Federal do Paraná**. 128f. Dissertação (mestrado) Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Curitiba-PR, 2006.

FINNISH STANDARDS ASSOCIATION (SFS), **SFS 5907:EN ACOUSTIC CLASSIFICATION OF SPACES IN BUILDINGS**. SUOMEN STANDARDISOIMISLIITTO. 2004.

FRENCH, N. R.; STEINBERG, J. C. Factors governing the intelligibility of speech sounds. **The journal of the Acoustical society of America**, v. 19, n. 1, p. 90-119, 1947.

GALBRUN, L.; KITAPCI, K. Speech intelligibility of English, Polish, Arabic and Mandarin under different room acoustic conditions. **Applied Acoustics**, v. 114, p. 79-91, 2016.

GERGES, S. NY. **Ruído: fundamentos e controle**. In: Ruído: fundamentos e controle. 1992.

GEVREY, M.; DIMOPOULOS, I.; LEK, Sovan. Review and comparison of methods to study the contribution of variables in artificial neural network models. **Ecological modelling**, v. 160, n. 3, p. 249-264, 2003.

HARRIS, C. M. **Noise control in buildings: a guide for architects and engineers**. McGraw-Hill Companies, 1994.

HAYKIN, S. S. et al. **Neural networks and learning machines**. Upper Saddle River: Pearson, 2009.

HERRMANN, J. O. 117 p. **Medições e simulações de índice de transmissão de fala (STI) definição (D50) e tempo de reverberação (Tr) em salas de aula**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Curitiba -PR, 2018.

HODGSON, M. Rating, ranking, and understanding acoustical quality in university classrooms. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 112, n. 2, p. 568-575, 2002.

HOHMANN, R.; SETZER, M. J.; WEHLING, M. **Bauphysikalische Formeln und Tabellen**. 4.ed. Werner Verlag, 2004.

HOMB, A. Norwegian experiences of acoustics in classrooms. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 141, n. 5, p. 3542-3542, 2017.

HOUTGAST, T. et al. **Past, present and future of the Speech Transmission Index**. Soesterberg: TNO, 2002.

HOUTGAST, T.; STEENEKEN, H. J. M. A multi-language evaluation of the RASTI-method for estimating speech intelligibility in auditoria. **Acta Acustica united with Acustica**, v. 54, n. 4, p. 185-199, 1984.

HOUTGAST, T.; STEENEKEN, H. J. M.; PLOMP, R. Predicting speech intelligibility in rooms from the modulation transfer function. I. General room acoustics. **Acta Acustica united with Acustica**, v. 46, n. 1, p. 60-72, 1980.

HOUTTE, E. V. H et al. The impact of voice disorders among teachers: vocal complaints, treatment-seeking behavior, knowledge of vocal care, and voice-related absenteeism. **Journal of voice**, v. 25, n. 5, p. 570-575, 2011.

HUSTIM, M. et al. Assessing Noise Pollution and its Impact on Student's Blood Pressure and Their Learning Performance in Palestine. In: **MATEC Web of Conferences. EDP Sciences**, v. 203, p. 03008, 2018.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). **IEC 60268-16**: Sound system equipment – Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index. Switzerland, 2011.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 3382-1**: Acoustics -- Measurement of room acoustic parameters -- Part 1: Performance spaces, Switzerland, 2009.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 3382-2**: Acoustics -- Measurement of room acoustic parameters -- Part 2: Reverberation time in ordinary rooms, Switzerland, 2008.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 4870**: Acoustics - The construction and calibration of speech intelligibility tests. Genève, 1991.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 9921**: Ergonomics – Assessment of speech communication. Switzerland, 2003.

JACKSON, J. E. **A user's guide to principal components**. John Wiley & Sons, 1991.

JERISON, H. J. Effects of noise on human performance. **Journal of Applied Psychology**, v. 43, n. 2, p. 96, 1959.

JIANXIN, P.; CHENGXUN, B. **Prediction of Chinese speech intelligibility using useful to detrimental sound ratios based on auralization**. In: Proceedings of International Symposium on Room Acoustics (ISRA), Melbourne, Australia. 2010.

JOLLIFFE, I. **Principal component analysis**. In: **International encyclopedia of statistical science**. Springer, Berlin, Heidelberg, p. 1094-1096, 2011.

JUNIOR, P. A. et al. Characterization of Automobile Acoustic Insulation Performance based on Artificial Neural Networks via Sensitivity Analysis. **IEEE Latin America Transactions**, v. 16, n. 1, p. 222-231, 2018.

KOCIŃSKI, J.; NIEMIEC, D. Time-compressed speech intelligibility in different reverberant conditions. **Applied Acoustics**, v. 113, p.58-63. 2016.

LEK, S. et al. Improved estimation, using neural networks, of the food consumption of fish populations. **Marine and Freshwater Research**, v. 46, n. 8, p. 1229-1236, 1995.

LOCHNER, J. P. A.; BURGER, J. F. The influence of reflections on auditorium acoustics. **Journal of Sound and Vibration**, v. 1, n. 4, p. 426-454, 1964.

LONG, M. **Architectural acoustics**. 2nd Ed, Elsevier, 2014.

LONGONI, H. C. et al. Speech transmission index variation due to ventilating and air-conditioning system in university classrooms. **In: Proceedings of Meetings on Acoustics 22ICA**. ASA, 2016. p. 015024.

LUNDBERG, Ulf; FRANKENHAEUSER, M. Psychophysiological reactions to noise as modified by personal control over noise intensity. **Biological Psychology**, v. 6, n. 1, p. 51-59, 1978.

MARSHALL, L. G. An acoustics measurement program for evaluating auditoriums based on the early/late sound energy ratio. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 96, n. 4, p. 2251-2261, 1994.

MASSON, F. et al. Intelligibility in a classroom: Coupling effects between outdoor noise and room acoustic response, **PROCEEDINGS of the 22nd International Congress on Acoustics**, p. 1 – 10, 2016.

MCCULLOCH, W. S.; PITTS, W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. **The bulletin of mathematical biophysics**, v. 5, n. 4, p. 115-133, 1943.

MIKULSKI, W.; RADOSZ, J. Acoustics of classrooms in primary schools-results of the reverberation time and the speech transmission index assessments in selected buildings. **Archives of Acoustics**, v. 36, n. 4, p. 777-793, 2011.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 8 ed, John wiley & sons, 724 p. 2013.

MURPHY, E.; KING, E. A. **Enviromental noise pollution: noise mapping, public health, and policy**. Burlington; San Diego: Elsevier, 2014.

MUSACCHIA, Gabriella et al. Effects of noise and age on the infant brainstem response to speech. **Clinical Neurophysiology**, v. 129, n. 12, p. 2623-2634, 2018.

NELSON, D. I. et al. The global burden of occupational noise-induced hearing loss. **American journal of industrial medicine**, v. 48, n. 6, p. 446-458, 2005.

NESTORAS, C.; DANCE, S. The Interrelationship Between Room Acoustics Parameters as Measured in University Classrooms Using Four Source Configurations. **Building Acoustics**, v. 20, n. 1, p. 43-53, 2013.

NIJS, L.; RYCHTÁRIKOVÁ, M. Calculating the optimum reverberation time and absorption coefficient for good speech intelligibility in classroom design using U50. **Acta Acustica united with Acustica**, v. 97, n. 1, p. 93-102, 2011.

NOWOŚWIAT, A.; OLECHOWSKA, M. Fast estimation of speech transmission index using the reverberation time. **Applied Acoustics**, v. 102, p. 55-61, 2016.

PASSERO, C. R; ZANNIN, P. H. T., Statistical comparison of reverberation times measured by the integrated impulse response and interrupted noise methods,

computationally simulated with ODEON software, and calculated by Sabine, Eyring and Arau-Puchades' formulas. **Applied Acoustics**, v. 71, n. 12, p. 1204-1210, 2010.

PENG, J.; ZHANG, H.; WANG, D. Measurement and analysis of teaching and background noise level in classrooms of Chinese elementary schools. **Applied Acoustics**, v. 131, p. 1-4, 2018.

PHADKE, K. V. et al. Influence of Noise Resulting from the Location and Conditions of Classrooms and Schools in Upper Egypt on Teachers' Voices. **Journal of Voice**, 2018.

PIOTROWSKI, A. P.; NAPIORKOWSKI, J. J. A comparison of methods to avoid overfitting in neural networks training in the case of catchment runoff modelling. **Journal of Hydrology**, v. 476, p. 97-111, 2013.

RABELO, A. et al. Efeito das características acústicas de salas de aula na inteligibilidade de fala dos estudantes. **CEP**, v. 31270, p. 901, 2014.

RANTALA, L. M.; SALA, E. Effects of Classroom Acoustics on Teachers' Voices. **Building Acoustics**, v. 22, n. 3-4, p. 243-258, 2015.

RENNIES, J. et al. Listening effort and speech intelligibility in listening situations affected by noise and reverberation. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 136, n. 5, p. 2642-2653, 2014.

RIGDEN, J. S. Physics and the Sound of Music. **Physics and the Sound of Music**, 2nd Edition, Wiley-VCH, p. 368, 1985.

ROMAN, N.; WOODRUFF, J. Speech intelligibility in reverberation with ideal binary masking: Effects of early reflections and signal-to-noise ratio threshold. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 133, n. 3, p. 1707-1717, 2013.

RUSSELL, S. J.; NORVIG, P. **Artificial intelligence: a modern approach**. Malaysia; Pearson Education Limited. 2016.

SAKAMOTO, S. et al. Complementary relationship between familiarity and SNR in word intelligibility test. **Acoustical science and technology**, v. 25, n. 4, p. 290-292, 2004.

SALA, E.; RANTALA, L. Acoustics and activity noise in school classrooms in Finland. **Applied acoustics**, v. 114, p. 252-259, 2016.

SATO, H. et al. Relationship between speech intelligibility and objective measures in sound fields with a discrete long-path echo. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 140, n. 4, p. 3193-3193, 2016.

SATO, H. et al. The relation between speech transmission index, clarity, and reverberation time and listening difficulty in the impulse response database of AIJ. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 120, n. 5, p. 3321-3321, 2006.

SATO, H.; MORIMOTO, M.; WADA, M. Relationship between listening difficulty rating and objective measures in reverberant and noisy sound fields for young adults and elderly persons. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 131, n. 6, p. 4596-4605, 2012.

SECCHI, S. et al. Effect of outdoor noise and façade sound insulation on indoor acoustic environment of Italian schools. **Applied Acoustics**, v. 126, p. 120-130, 2017.

SOMMERHOFF, J.; ROSAS, C. Estudio de la correlación entre STI y test de inteligibilidad subjetivo. **Estudios filológicos**, n. 47, p. 133-147, 2011.

STEENEKEN, H. J. M; HOUTGAST, T. Phoneme-group specific octave-band weights in predicting speech intelligibility. **Speech Communication**, v. 38, n. 3-4, p. 399-411, 2002.

SZALMA, J. L.; HANCOCK, Peter A. Noise effects on human performance: a meta-analytic synthesis. **Psychological bulletin**, v. 137, n. 4, p. 682, 2011.

TANG, S. K.; YEUNG, M. H. Reverberation times and speech transmission indices in classrooms. **Journal of sound and vibration**, v. 294, n. 3, p. 596-607, 2006.

TANG, S. K.; YEUNG, M. H. Speech transmission index or rapid speech transmission index for classrooms? A designer's point of view. **Journal of sound and vibration**, 2004.

VAN GEMMERT, A. W. A; VAN GALEN, G. P. Stress, neuromotor noise, and human performance: A theoretical perspective. **Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance**, v. 23, n. 5, p. 1299, 1997.

WATTS, G.; KHAN, A.; PHEASANT, R. Influence of soundscape and interior design on anxiety and perceived tranquillity of patients in a healthcare setting. **Applied Acoustics**, v. 104, p. 135-141, 2016.

WILAMOWSKI, B. M.; YU, Hao. Improved computation for Levenberg–Marquardt training. **IEEE transactions on neural networks**, v. 21, n. 6, p. 930-937, 2010.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **Guidelines for Community Noise**, World Health Organization. Occupational and Environmental Health Team., 1999. Disponível em: < <http://www.who.int/iris/handle/10665/66217> >.

YANG, D. and MAK, C. M. An investigation of speech intelligibility for second language students in classrooms. **Applied Acoustics**, v. 134, p. 54-59, 2018.

YANG, W.; BRADLEY, J. S. Effects of room acoustics on the intelligibility of speech in classrooms for young children. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 125, n. 2, p. 922-933, 2009.

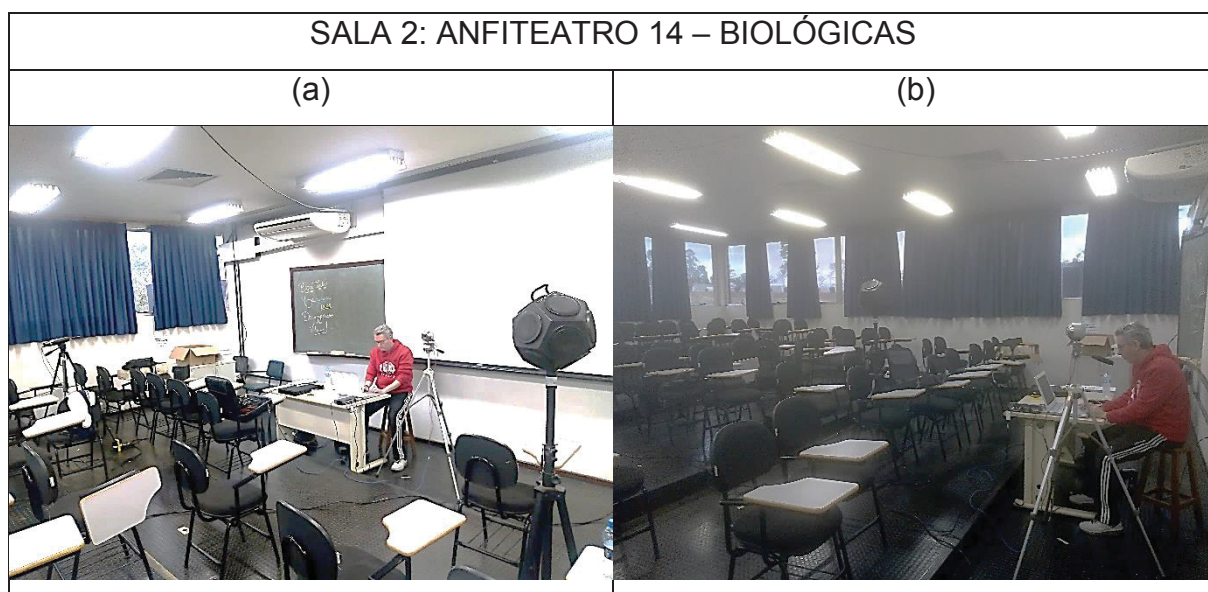
ZANNIN, P. H. T. et al. Characterization of environmental noise based on noise measurements, noise mapping and interviews: A case study at a university campus in Brazil. **Cities**, v. 31, p. 317-327, 2013.

ZANNIN, P. H. T. et al. **Classroom Acoustics: Measurements, Simulations and Applications**. In: Rebecca J. Newley. (Org.). Classrooms: Management, Effectiveness and Challenges. 1ed. New York, USA: Nova Science Publishers, 2011, v. 1, p. 133-161.

ZANNIN, P. H. T.; FERREIRA, A.; DE SANT'ANA, D. Comparação do tempo de reverberação e índice de transmissão da fala (STI) em salas de aula construídas em décadas diferentes. **Ambiente Construído**, v. 9, n. 3, p. 125-139, 2009.

APÊNDICE 1 – FOTOS DAS SALAS DE AULA

Neste apêndice, mostram-se as fotos das salas. Nas fotos em (a), mostra-se a vista dos alunos direcionada ao professor, enquanto nas fotos em (b) mostra-se a vista do professor direcionada aos alunos.



SALA 3: PG 06 – ENGENHARIA MECÂNICA

(a)



(b)



SALA 4: ANFITEATRO 04 - BIOLÓGICAS

(a)



(b)



SALA 2: ANFITEATRO 02 – BIOLÓGICAS

(a)



(b)



APÊNDICE 2 – COEFICIENTES DE ABSORÇÃO DAS SUPERFÍCIES

SUPERFÍCIES RELEVANTES PARA AUDITÓRIO 1

Superfície	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8kHz
Piso /Chão/7001	0,03	0,03	0,09	0,25	0,31	0,33	0,44	0,44
Porta/Madeira/10007	0,14	0,14	0,10	0,06	0,08	0,10	0,10	0,10
Parede/102	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Teto/23600	0,25	0,25	0,25	0,85	0,94	0,53	0,03	0,0
Poltronas/11057 Scater 0,650	0,35	0,35	0,45	0,57	0,61	0,59	0,55	0,55
Janelas/8011	0,07	0,07	0,31	0,49	0,81	0,66	0,54	0,54
Audiência/11007	0,72	0,72	0,80	0,86	0,89	0,90	0,90	0,90

FONTE: O autor (2019).

SUPERFÍCIES RELEVANTES PARA ANF. 14

Superfície	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8kHz
Piso /Chão/23800	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02
Hastes alumínio/ 100	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,07	0,07
Espaço de ventilação/10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Madeira compensada das cadeiras/20003	0,03	0,02	0,05	0,05	0,05	0,04	0,03	0,02
Quadro/3004	0,15	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07	0,07
Porta/Madeira/10007	0,14	0,14	0,10	0,06	0,08	0,10	0,10	0,10
Parede/102	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Teto/24100	0,15	0,19	0,21	0,32	0,41	0,49	0,53	0,53
Estofados poltronas /23700	0,15	0,15	0,19	0,22	0,39	0,38	0,30	0,30
Janelas vidro comum/23900	0,35	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04	0,04
Audiência/11007	0,07	0,07	0,31	0,49	0,81	0,66	0,54	0,54

FONTE: O autor (2019).

SUPERFÍCIES RELEVANTES PARA PG 06

Superfície	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8kHz
Mesa de madeira/10007	0,14	0,14	0,10	0,06	0,08	0,10	0,10	0,10
Paredes com reboco /104	0,11	0,11	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05	0,05
Forro da arquibancada/4000	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05
Janelas laterais/10001	0,18	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02
Deque dos alunos/10007	0,14	0,14	0,10	0,06	0,08	0,10	0,10	0,10
Vigas de concreto com reboco/104	0,11	0,11	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05	0,05
Piso de tacos/3005	0,20	0,20	0,15	0,10	0,05	0,05	0,10	0,10
Porta de madeira/10007	0,14	0,14	0,10	0,06	0,08	0,10	0,10	0,10
Quadro/10007	0,14	0,14	0,10	0,06	0,08	0,10	0,10	0,10
Teto/24200	0,05	0,25	0,35	0,35	0,29	0,25	0,26	0,10
Janelas de ventilação/10002	0,08	0,04	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02
Audiência/11007	0,07	0,07	0,31	0,49	0,81	0,66	0,54	0,54

FONTE: O autor (2019).

SUPERFÍCIES RELEVANTES PARA ANF. 04

Superfície	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8kHz
Chão/102	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Paredes/102	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Porta/10007	0,14	0,14	0,10	0,06	0,08	0,10	0,10	0,10
Teto/24300	0,01	0,05	0,13	0,20	0,70	0,54	0,25	0,15
Quadro/3001	0,01	0,01	0,07	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06
Madeira/10007	0,14	0,14	0,10	0,06	0,08	0,10	0,10	0,10
Estofado/101	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,05	0,05
Clareira/10009	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
Saída de ar/10009	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60

FONTE: O autor (2019).

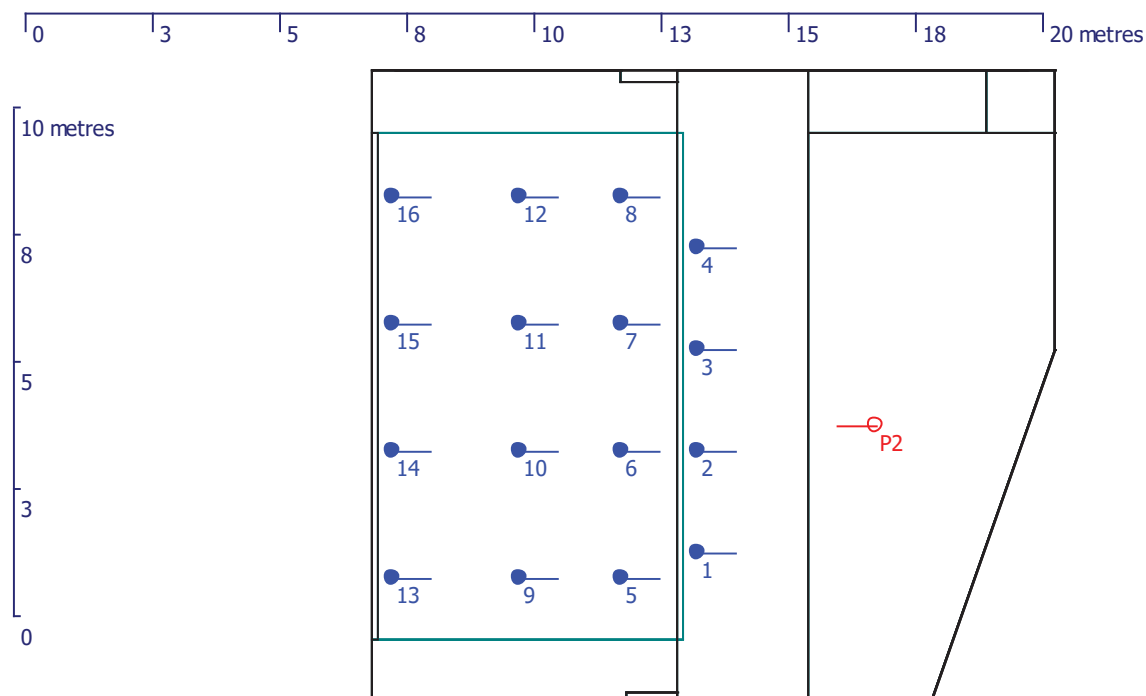
SUPERFÍCIES RELEVANTES PARA ANF. 02

Superfície	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8kHz
Porta de madeira/10007	0,14	0,14	0,10	0,06	0,08	0,10	0,10	0,10
Viga/102	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Teto/24800	0,05	0,05	0,10	0,12	0,20	0,25	0,30	0,15
Parede/102	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Chão/2001	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Vidro/10005	0,18	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02
Estofado/24700	0,01	0,15	0,26	0,68	0,79	0,56	0,52	0,35
Quadro/3062	0,30	0,30	0,20	0,15	0,13	0,10	0,08	0,08
Fórmica/20003	0,03	0,02	0,05	0,05	0,05	0,04	0,03	0,02

FONTE: O autor (2019).

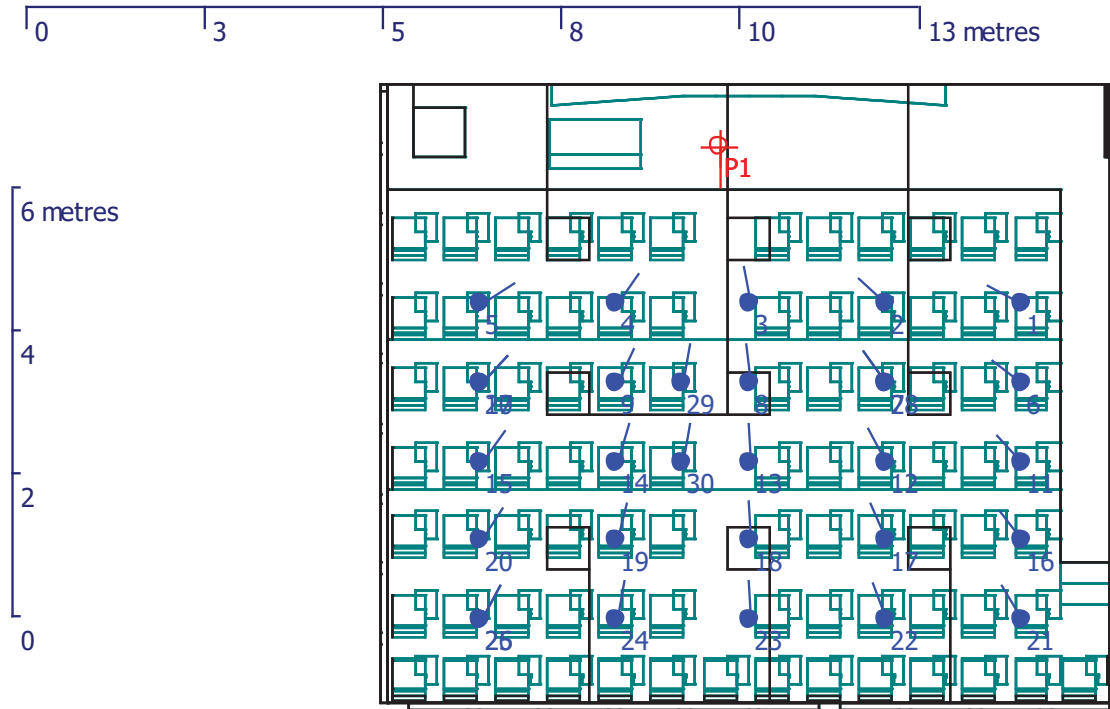
APÊNDICE 3 – VALORES DE STI MEDIDOS VERSUS SIMULADOS

Sala Auditório 1 – Engenharia Química



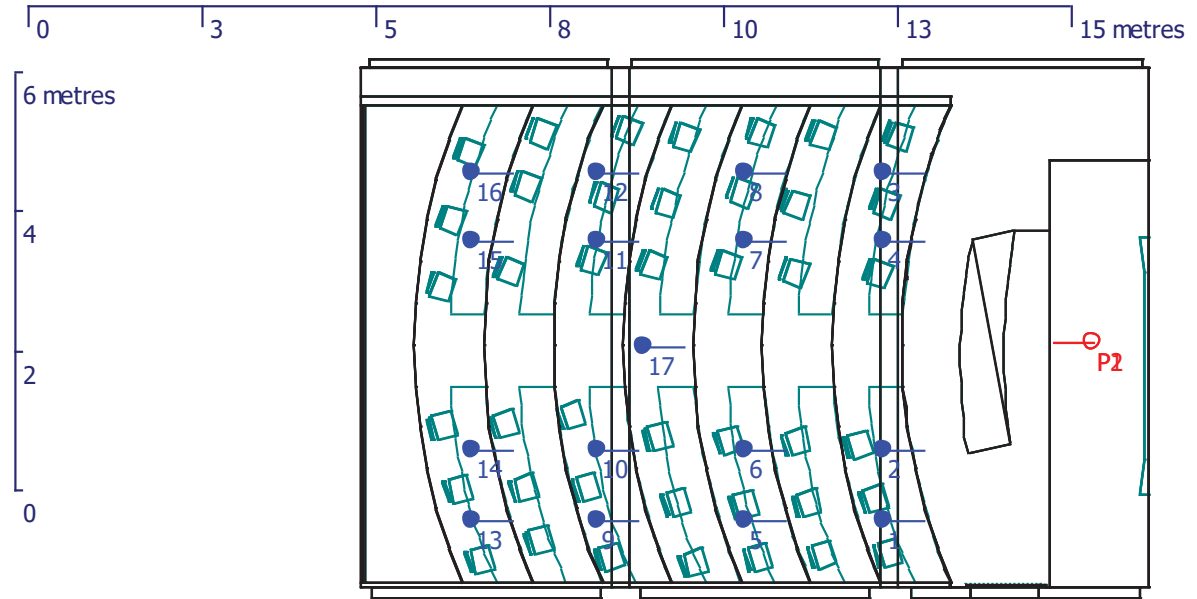
SALA: AUD 1 ENG QUI						
DESCRIPTOR: STI						
PONTO	EIXO - X	EIXO - Y	EIXO - Z	MEDIDO	SIMULADO	ERRO %
BOCA	1,50	2,50	1,50	--	--	--
FONTE	2,00	2,50	1,50	--	--	--
1	7,00	9,50	1,40	0,74	0,74	0%
2	7,00	7,50	1,40	0,79	0,76	4%
3	7,00	5,50	1,40	0,82	0,74	10%
4	7,00	3,50	1,40	0,77	0,71	8%
5	8,50	10,00	1,50	0,68	0,72	6%
6	8,50	7,50	1,50	0,74	0,71	4%
7	8,50	5,00	1,50	0,75	0,71	5%
8	8,50	2,50	1,50	0,71	0,70	1%
9	10,50	10,00	1,60	0,64	0,72	13%
10	10,50	7,50	1,60	0,67	0,72	7%
11	10,50	5,00	1,60	0,69	0,73	6%
12	10,50	2,50	1,60	0,68	0,70	3%
13	13,00	10,00	1,60	0,62	0,70	13%
14	13,00	7,50	1,70	0,65	0,63	3%
15	13,00	5,00	1,40	0,68	0,73	7%
16	13,00	2,50	1,70	0,67	0,73	9%

Sala ANF 14 – Biológicas



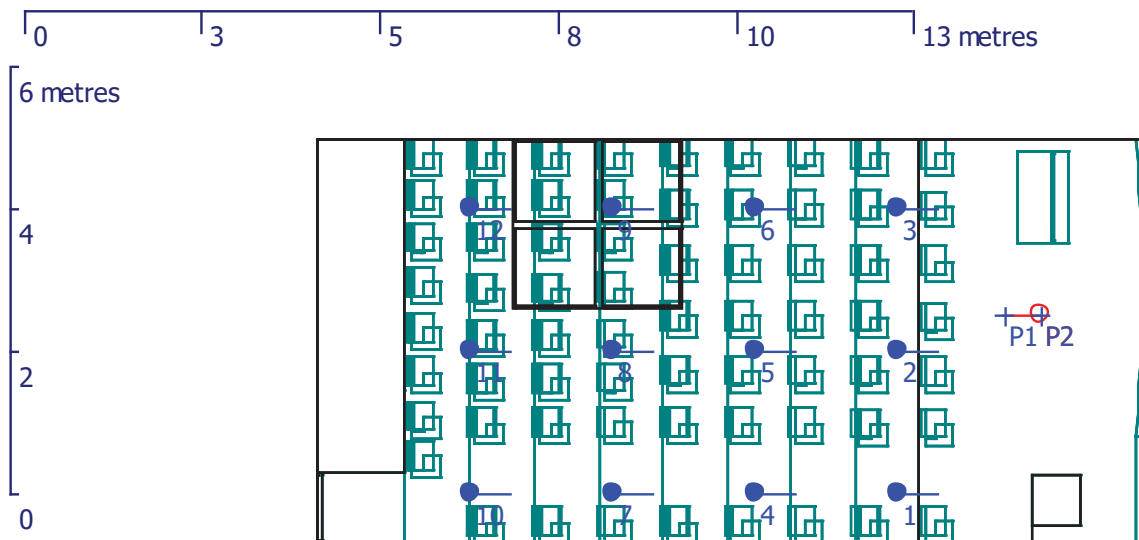
SALA: ANFITEATRO 14						
DESCRITOR: STI						
PONTO	EIXO - X	EIXO - Y	EIXO - Z	MEDIDO	SIMULADO	ERRO %
BOCA	1,50	2,50	1,50	--	--	--
FONTE	2,00	2,50	1,50	--	--	--
1	1,20	3,10	1,45	0,60	0,64	7%
2	3,10	3,10	1,45	0,65	0,67	3%
3	5,00	3,10	1,45	0,67	0,72	7%
4	6,90	3,10	1,45	0,66	0,71	8%
5	8,80	3,10	1,45	0,61	0,63	3%
6	1,20	5,30	1,55	0,61	0,59	-3%
7	3,10	5,30	1,55	0,63	0,63	0%
8	5,00	5,30	1,55	0,65	0,67	3%
9	6,90	5,30	1,55	0,64	0,61	-5%
10	8,80	5,30	1,55	0,62	0,63	2%
11	1,20	7,50	1,65	0,61	0,62	2%
12	3,10	7,50	1,65	0,62	0,61	-2%
13	5,00	7,50	1,65	0,62	0,64	3%
14	6,90	7,50	1,65	0,63	0,63	0%
15	8,80	7,50	1,65	0,62	0,62	0%

Sala PG 06 – Engenharia Mecânica



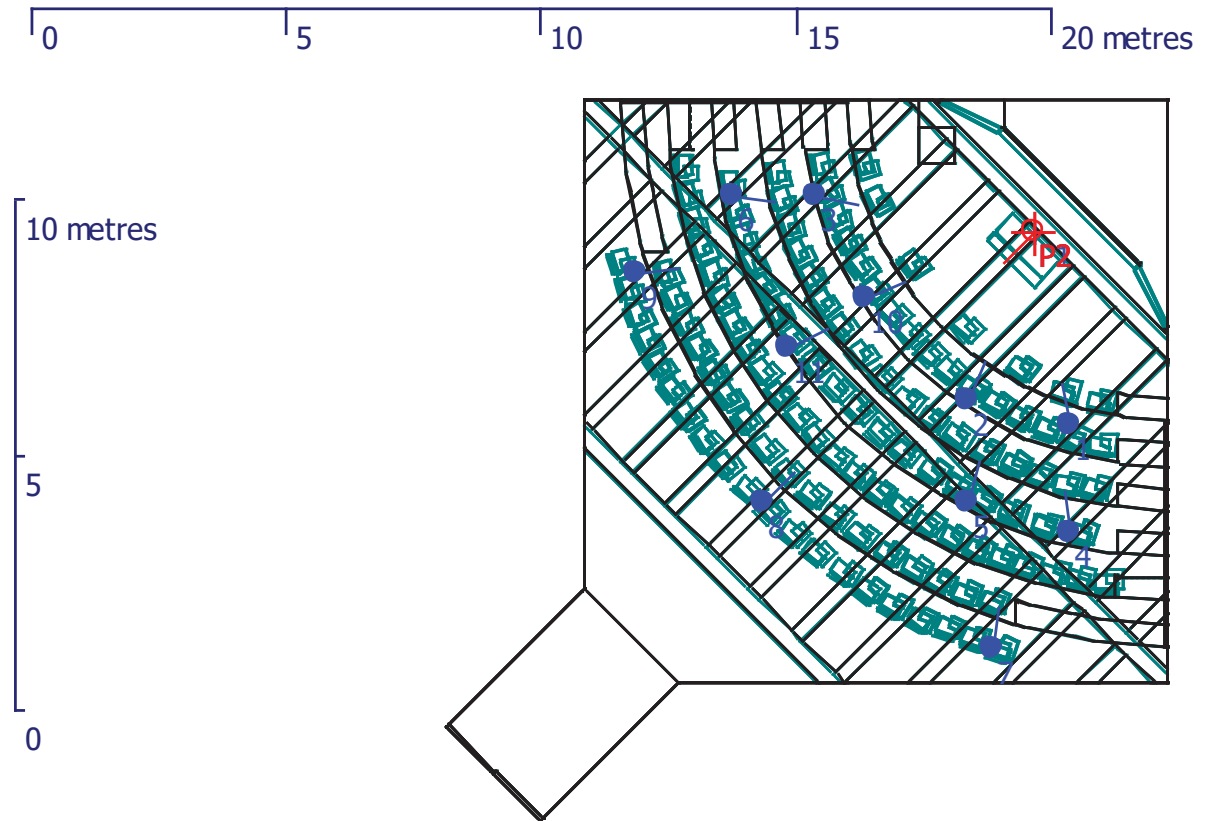
SALA: PG 6						
DESCRIPTOR: STI						
PONTO	EIXO - X	EIXO - Y	EIXO - Z	MEDIDO	SIMULADO	ERRO %
BOCA	0,79	3,95	1,50	--	--	--
FONTE	0,79	3,95	1,50	--	--	--
1	3,80	6,50	1,40	0,58	0,57	-2%
2	3,80	5,50	1,40	0,59	0,57	-3%
3	3,80	1,50	1,40	0,58	0,56	-3%
4	3,80	2,50	1,40	0,59	0,59	0%
5	5,80	6,50	1,80	0,56	0,51	-9%
6	5,80	5,50	1,80	0,56	0,50	-11%
7	5,80	2,50	1,80	0,56	0,53	-5%
8	5,80	1,50	1,80	0,56	0,53	-5%
9	7,90	6,50	2,20	0,56	0,53	-5%
10	7,90	5,50	2,20	0,56	0,53	-5%
11	7,90	2,50	2,40	0,56	0,52	-7%
12	7,90	1,50	2,40	0,52	0,54	4%
13	9,70	6,50	2,60	0,53	0,53	0%
14	9,70	5,50	2,60	0,53	0,53	0%
15	9,70	2,50	2,60	0,53	0,53	0%
16	9,70	1,50	2,60	0,54	0,53	-2%

Sala ANF 04 – Biológicas



SALA: ANFITEATRO 04						
DESCRITOR: STI						
PONTO	EIXO - X	EIXO - Y	EIXO - Z	MEDIDO	SIMULADO	ERRO %
BOCA	1,50	2,50	1,50	--	--	--
FONTE	2,00	2,50	1,50	--	--	--
1	3,50	5,00	1,20	0,61	0,60	-2%
2	3,50	3,00	1,20	0,58	0,63	8%
3	3,50	1,00	1,20	0,58	0,62	6%
4	5,50	5,00	1,30	0,57	0,58	2%
5	5,50	3,00	1,30	0,62	0,61	-2%
6	5,50	1,00	1,30	0,59	0,57	-4%
7	7,50	5,00	1,60	0,59	0,57	-4%
8	7,50	3,00	1,60	0,57	0,57	0%
9	7,50	1,00	1,60	0,59	0,57	-4%
10	9,50	5,00	2,00	0,58	0,57	-2%
11	9,50	3,00	2,00	0,57	0,57	0%
12	9,50	1,00	2,00	0,56	0,58	3%

Sala ANF 02 – Biológicas



SALA: ANFITEATRO 02						
DESCRITOR: STI						
PONTO	EIXO - X	EIXO - Y	EIXO - Z	MEDIDO	SIMULADO	ERRO %
BOCA	0,70	0,70	1,50	--	--	--
FONTE	0,70	0,70	1,50	--	--	--
1	0,00	4,50	1,00	0,53	0,55	4%
2	2,00	4,00	1,00	0,57	0,58	2%
3	5,00	0,00	1,00	0,57	0,58	2%
4	0,00	6,60	1,80	0,50	0,55	10%
5	2,00	6,00	1,80	0,54	0,55	2%
6	6,60	0,00	1,80	0,48	0,54	13%
7	1,50	8,90	2,85	0,52	0,51	-2%
8	6,00	6,00	2,85	0,52	0,55	6%
9	8,50	1,50	2,90	0,49	0,51	4%
10	4,00	2,00	1,00	0,57	0,61	7%
11	5,50	3,00	1,80	0,50	0,55	10%

APÊNDICE 4 – PROGRAMAS MATLAB®

PROGRAMA PARA CRIAR AS REDES NEURAIIS

```

close all, clear all; clc
% Autor: Eriberto Oliveira do Nascimento

load('PCA_ANF02_DATA_19_12_18.mat')

% Parâmetros estáticos
% Estratificando os dados de entrada - Input
input = MC(:,1:end)';
% 1 - EDT; 2 - T30; 3 - Ts; 4 - D50; 5-U50; 6 - STI
target = y(:,1)'; % Está analisando o EDT
xn = 1:length(input);
% Fazendo alguns tratamentos
%net.inputs{1}.name = 'Entrada';
%net.inputs{1}.processFcns = {'removeconstantrows','mapminmax'};
%net.outputs{4}.processFcns = {'removeconstantrows','mapminmax'};
% Parametros dos treinamentos
%net.divideParam.trainRatio = 100/100;
%net.divideParam.valRatio = 1/100;
%net.divideParam.testRatio = 1/100;
%net.trainParam.goal = 1e-16;
%net.trainParam.time = 30; % Segundos
%net.trainParam.epochs = 1e4;
%net.trainParam.max_fail = 1e4;
% view(net)

numNN = 50; % Número dos múltiplos de RNA
nets = cell(3,numNN);

%Define as redes neurais
% O número de camadas ocultas deve ser sempre o mesmo
% de neurônios em todas as camadas podem ser diferentes
R = [5 5; 10 10; 15 15; 20 20; 30 30; 35 35];
save('Redes.mat','R')

for n=1:size(R,1)

    % Parâmetros dinâmicos
    net = feedforwardnet(R(n,:), 'trainlm');

    for i=1:numNN

        % 1 - Múltiplos treinamentos

        disp(['Training ' num2str(i) '/' num2str(numNN)])
        net = init(net); % Assegura a reinicialização em zero
        [nets{1,i},tr] = train(net,input,target);
        nets{2,i} = tr;
        neti = nets{1,i};
        nets{3,i} = mse(neti,target,neti(input));
        net = init(net); % Assegura a reinicialização em zero
    end

    save(['Result_', num2str(R(n,1)), '_', num2str(R(n,2)), '.mat' ],...
        'nets','input','target')

```

```

% 2 - Cálculo da Média dos múltiplos treinamentos sem otimizar
% ----- Resultado não otimizado -----

perfs = zeros(1,numNN);
y2Total = 0;

for i=1:(numNN)
    neti = nets{1,i};
    y2 = neti(input);
    perfs(i) = mse(neti,input,target);
    y2Total = y2Total + y2;
end

y2AverageOutput1 = y2Total / (numNN);
perfAveragedOutputs1 = mse(target,y2AverageOutput1);

% Correlation coeficientes
R1 = corrcoef(target',y2AverageOutput1');

% ----- Resultado otimizado -----
% Retirar os pontos de erro acima do tolerado

Numfail = 0; % Quantas topologias serão retiradas do resultado.
epsilon = 0; % tolerância ao erro
auxi = [];
% mean(cell2mat(nets(3,:)))

for i=1:numNN
    if (nets{3,i} - mean(cell2mat(nets(3,:))) ) >= epsilon
        Numfail = Numfail + 1;
        auxi(Numfail) = i;
    end
end

auxi = fliplr(auxi); % Inverte a ordem do vetor
for i=1:length(auxi)
    j = auxi(i);
    nets(:,j) = []; % removendo o outlier
end

save(['Transition_', num2str(R(n,1)),'_',num2str(R(n,2)),'.mat' ],...
    'nets')

perfs = zeros(1,numNN-Numfail);
y2Total = 0;
for i=1:(numNN-Numfail)
    neti = nets{1,i};
    y2 = neti(input);
    perfs(i) = mse(neti,input,target);
    y2Total = y2Total + y2;
end

y2AverageOutput2 = y2Total / (numNN-Numfail);
perfAveragedOutputs2 = mse(target,y2AverageOutput2);

% Correlation coeficientes
R2 = corrcoef(target',y2AverageOutput2');

% Plotando a saída dos múltiplos treinamentos
figure(1)

```

```

plot(xn,target,xn,y2AverageOutput1,xn,y2AverageOutput2);
legend('Dados experimentais','Média das RNA sem otimização',...
      'Média das RNA com otimização')

% -----

% Esta rotina plota o gráfico da curva de erro percentual com
otimização
erro = zeros(1,length(target));

for j=1:length(input)
    erro(j) = (target(j) - y2AverageOutput2(j)) / (target(j)) * 100;
end

figure(3)
plot(xn,erro);
title('Erros percentuais de estimativa');
xlabel('Valor experimental da saída da RNA')
ylabel('Erro de estimativa')

% Relatório gráfico no console do maltab.
disp('Relatório do resultado')
disp(['Alvo do MSE: ' num2str(net.trainParam.goal) ]);
disp(['MSE sem otimização das ' num2str(numNN) ' RNAs: ' ...
      num2str(perfAveragedOutputs1) ]);
disp(['MSE com otimização: ' num2str(numNN-Numfail) ' RNAs: ' ...
      num2str(perfAveragedOutputs2) ]);
disp(['Coeficiente de correlação (R), sem-otimização: '
      num2str(R1(1,2))]);
disp(['Coeficiente de correlação (R), com-otimização: '
      num2str(R2(1,2))]);

end

```

FUNÇÃO QUE CÁLCULA A MÉDIA DE VÁRIAS REDES

```

function yn = Automatizacao_MeanANN(input,n)

% Entrada da função - vetor, x1,x2,x3
% Saída da função - valor escalar

% Carrega as Redes Previamente definidas e treinadas
load('Redes.mat')

% A topologia a ser treinada é determinada pela entrada da função
% MeanANN (input, n), sendo representado pelo segundo argumento

load(['Transition_', num2str(R(n,1)),'_',num2str(R(n,2)),'.mat'])

y2Total = 0;
Num_net = length(cell2mat(nets(3,:)));

for i=1:Num_net

    neti = nets{1,i};
    y2 = neti(input);
    y2Total = y2Total + y2;

```

```
end
```

```
yn = y2Total / Num_net;
```

```
end
```

PROGRAMA DO MPM – MÉTODO PROFILE MODIFICADO

```
close all; clear all; clc
```

```
% Autor: Eriberto Oliveira do Nascimento
```

```
% Universidade Federal do Paraná
```

```
% Mestrado em Engenharia Mecânica - PGMEC - 2019
```

```
% Data: 31/08/2016
```

```
% Data: 29/11/2016
```

```
% Data: 13/12/2016
```

```
% Data: 18/12/2016 - Automatizou a quantidade de variáveis
```

```
% Data: 09/06/2017 - Adicionou a automatização das redes
```

```
% Data: 26/12/2017 - Dados para a dissertação UFPR
```

```
% Data: 27/09/2018 - Melhorou performance durante a dissertação
```

```
% Data: 04/01/2019 - Finalizou o programa
```

```
escala = 12; % determina a escala
```

```
num_var = 15; % determina a quantidade de variáveis
```

```
load('PCA_ANF02_DATA_19_12_18.mat')
```

```
matriz_sig = MC'; % Define a matriz de significância/contraste
```

```
% < Cada coluna > representa uma variável
```

```
% 1 - Define os vetores das escalas de varredura
```

```
range_var = zeros(2, num_var); % Pre-allocando as variáveis do range
```

```
for n=1:num_var
```

```
    range_var(:,n) = [min(matriz_sig(:,n)), max(matriz_sig(:,n))];
```

```
end
```

```
% 2 - Define os novos vetores das variáveis na nova escala
```

```
escala_var = zeros(escala,num_var); % Pre-allocando as variáveis
```

```
for n=1:num_var
```

```
    escala_var(:,n) = linspace(range_var(1,n),range_var(2,n),escala);
```

```
end
```

```
% 3 - % Avaliação estatística, determinando os quartis
```

```
% Determinando: valor Min, primeiro, segundo e terceiro quartis, valor Max
```

```
quantile_var = zeros(5,num_var); % Pre-allocando as variáveis
```

```
for n=1:num_var
```

```
    quantile_var(:,n) = quantile(escala_var(:,n),[0, 0.25, 0.5, 0.75, 1]);
```

```
end
```

```
% Acoplamento da Rede Neural
```

```
var_aux = zeros(5,1); % São cinco pontos em análise
```

```
var_Profile = zeros(escala, num_var); % Pre-allocando as variáveis
```

```
% Acoplando a otimização do dia 09/06/2017
```

```
% Que introduziu o cálculo de várias topologias ao mesmo tempo
```



```

% Carregas as Redes Treinadas e desenvolvidas
load('Redes.mat')

for n=1:size(R,1)

    for j=1:num_var

        var_par = escala_var(:,j); % Variável em análise de partição

        for i=1:escala

            for k=1:5 % Analise para a variação do quartil, são 5 pontos

                input = quantile_var(k,:);
                input(j) = var_par(i);

                % variável auxiliar
                var_aux(k,1) = Automatizacao_MeanANN(input',n);

            end

            var_Profile(i,j) = mean(var_aux);

        end

        % figure
        % plot(escala_var(:,j),var_Profile(:,j))
        % xlabel('Escala')
        % ylabel('Variável de resposta')
        % title('')

        % Tem que salvar o resultado do Método Profile
        % Similar ao Result e Transition
        % Depois gerar a regressão automática, ou avaliar o resultado
        % automaticamente pelo valor máximo, RMS, à diferença de
        % amplitude máxima

        save(['Profile_', num2str(R(n,1)),'_',num2str(R(n,2)),'.mat' ],...
            'escala_var','var_Profile')

    end

end
end

```

APÊNDICE 5 – VALORES NOMINAIS DOS EFEITOS

Sala Auditório 1 – Engenharia Química

MPM - AUD 1							DOE - AUD 1						
	EDT	T30	Ts	D50	U50	STI		EDT	T30	Ts	D50	U50	STI
A	-0,05	-0,02	-0,05	-0,03	-0,49	-0,44	A	0,00	0,00	0,00	0,00	-1,88	-1,92
B	-0,35	-0,33	-0,38	0,46	-0,01	-0,07	B	-1,66	-1,50	-1,75	1,74	0,05	-0,06
AB	0,00	-0,02	0,03	0,05	-0,15	-0,08	AB	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,41	-0,25
C	0,09	-0,24	0,04	-0,05	-0,11	-0,07	C	0,43	-0,71	0,24	-0,31	-0,03	0,00
AC	-0,04	-0,03	-0,03	0,02	-0,03	-0,01	AC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,02
BC	0,02	-0,16	-0,05	0,01	-0,05	-0,05	BC	0,04	-0,48	-0,06	0,03	0,00	0,00
ABC	-0,06	-0,05	0,02	0,02	0,01	-0,07	ABC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
D	-0,23	-0,14	-0,11	0,19	-0,01	-0,06	D	-0,81	-0,70	-0,69	0,68	0,07	0,04
AD	0,00	-0,04	-0,01	0,02	-0,08	-0,06	AD	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,13	-0,07
BD	0,06	-0,04	0,02	-0,13	-0,03	-0,04	BD	0,38	-0,03	0,38	-0,41	-0,04	-0,03
ABD	-0,02	-0,01	-0,01	0,05	-0,02	-0,03	ABD	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,02
CD	0,00	-0,01	-0,01	0,02	-0,06	-0,05	CD	0,05	0,23	0,00	0,01	0,00	-0,03
ACD	-0,02	-0,07	-0,01	0,03	-0,01	-0,03	ACD	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,01
BCD	-0,05	0,12	0,01	0,04	0,01	-0,05	BCD	0,06	0,49	0,06	0,00	-0,01	0,01
ABCD	0,02	-0,05	-0,02	0,01	-0,07	0,02	ABCD	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,03

MPMz - AUD 1							DOEz - AUD 1						
	EDT	T30	Ts	D50	U50	STI		EDT	T30	Ts	D50	U50	STI
A	-0,07	0,49	-0,12	-0,59	-3,37	-3,50	A	0,20	0,37	0,24	-0,23	-3,51	-3,58
B	-2,78	-2,39	-3,36	3,13	0,51	0,03	B	-3,08	-2,73	-3,24	3,22	0,41	0,18
AB	0,38	0,49	0,66	0,02	-0,62	-0,07	AB	0,20	0,37	0,24	-0,23	-0,53	-0,20
C	1,19	-1,56	0,76	-0,74	-0,30	0,03	C	1,05	-1,09	0,72	-0,85	0,25	0,30
AC	0,02	0,40	0,07	-0,21	0,35	0,60	AC	0,20	0,37	0,24	-0,23	0,39	0,34
BC	0,56	-0,81	-0,12	-0,28	0,19	0,22	BC	0,28	-0,62	0,12	-0,17	0,31	0,30
ABC	-0,16	0,21	0,56	-0,21	0,67	0,03	ABC	0,20	0,37	0,24	-0,23	0,33	0,30
D	-1,69	-0,63	-0,71	1,08	0,51	0,12	D	-1,40	-1,07	-1,13	1,12	0,45	0,38
AD	0,38	0,30	0,27	-0,21	-0,05	0,12	AD	0,20	0,37	0,24	-0,23	0,04	0,16
BD	0,92	0,30	0,56	-1,34	0,35	0,31	BD	0,95	0,31	1,00	-1,04	0,23	0,24
ABD	0,20	0,58	0,27	0,02	0,43	0,41	ABD	0,20	0,37	0,24	-0,23	0,41	0,34
CD	0,38	0,58	0,27	-0,21	0,11	0,22	CD	0,30	0,85	0,24	-0,21	0,31	0,24
ACD	0,20	0,02	0,27	-0,13	0,51	0,41	ACD	0,20	0,37	0,24	-0,23	0,31	0,28
BCD	-0,07	1,79	0,46	-0,06	0,67	0,22	BCD	0,32	1,38	0,36	-0,23	0,29	0,32
ABCD	0,56	0,21	0,17	-0,28	0,03	0,88	ABCD	0,20	0,37	0,24	-0,23	0,33	0,36

Sala ANF 14 – Biológicas

MPM - ANF 14

	EDT	T30	Ts	D50	U50	STI
A	-0,08	0,01	0,02	0,00	-0,38	-0,43
B	-0,33	-0,29	-0,33	0,35	0,08	-0,01
AB	-0,01	0,04	-0,06	0,02	-0,05	-0,09
C	0,09	0,19	0,08	-0,13	-0,14	-0,14
AC	0,00	-0,04	-0,02	0,01	0,06	0,09
BC	-0,06	-0,08	-0,13	0,07	-0,07	-0,02
ABC	0,00	0,01	-0,04	-0,03	-0,02	0,00
D	-0,15	-0,09	-0,17	0,11	-0,01	-0,07
AD	-0,03	0,03	-0,06	0,01	0,02	0,03
BD	0,13	0,15	0,13	-0,15	-0,15	-0,14
ABD	-0,05	0,01	-0,03	-0,03	0,04	0,12
CD	-0,10	-0,04	-0,09	0,02	-0,08	-0,12
ACD	0,01	-0,04	-0,05	0,06	0,01	0,04
BCD	-0,03	0,09	0,06	-0,05	-0,12	-0,14
ABCD	0,02	0,00	-0,05	0,02	0,03	0,02

DOE - ANF 14

	EDT	T30	Ts	D50	U50	STI
A	0,00	0,00	0,00	0,00	-1,49	-1,59
B	-1,44	-1,38	-1,43	1,49	0,24	0,03
AB	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,34	-0,21
C	0,62	0,72	0,60	-0,61	-0,58	-0,48
AC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,51	0,45
BC	-0,41	-0,27	-0,40	0,33	-0,22	-0,18
ABC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,27	0,20
D	-0,77	-0,58	-0,76	0,75	0,06	-0,01
AD	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,06
BD	0,69	0,91	0,72	-0,68	-0,45	-0,45
ABD	0,00	0,00	0,00	0,00	0,38	0,42
CD	-0,23	-0,12	-0,25	0,14	-0,28	-0,24
ACD	0,00	0,00	0,00	0,00	0,27	0,23
BCD	0,13	0,26	0,15	-0,05	-0,30	-0,35
ABCD	0,00	0,00	0,00	0,00	0,21	0,24

MPMz - ANF 14

	EDT	T30	Ts	D50	U50	STI
A	-0,38	0,12	0,63	-0,16	-2,83	-2,80
B	-2,74	-2,58	-2,56	2,90	1,14	0,36
AB	0,28	0,39	-0,10	0,01	0,02	-0,25
C	1,22	1,74	1,18	-1,30	-0,76	-0,62
AC	0,37	-0,33	0,27	-0,08	0,97	1,11
BC	-0,19	-0,69	-0,73	0,45	-0,16	0,28
ABC	0,37	0,12	0,09	-0,43	0,28	0,43
D	-1,04	-0,78	-1,10	0,80	0,36	-0,10
AD	0,09	0,30	-0,10	-0,08	0,62	0,66
BD	1,59	1,38	1,63	-1,48	-0,85	-0,62
ABD	-0,10	0,12	0,18	-0,43	0,79	1,33
CD	-0,57	-0,33	-0,37	0,01	-0,24	-0,47
ACD	0,46	-0,33	-0,01	0,36	0,54	0,73
BCD	0,09	0,84	1,00	-0,60	-0,59	-0,62
ABCD	0,56	0,03	-0,01	0,01	0,71	0,58

DOEz - ANF 14

	EDT	T30	Ts	D50	U50	STI
A	0,18	0,06	0,18	-0,18	-2,73	-2,92
B	-2,64	-2,61	-2,63	2,75	0,70	0,31
AB	0,18	0,06	0,18	-0,18	-0,45	-0,17
C	1,40	1,45	1,36	-1,38	-0,93	-0,71
AC	0,18	0,06	0,18	-0,18	1,24	1,15
BC	-0,62	-0,46	-0,61	0,47	-0,21	-0,11
ABC	0,18	0,06	0,18	-0,18	0,76	0,65
D	-1,33	-1,06	-1,31	1,29	0,34	0,23
AD	0,18	0,06	0,18	-0,18	0,28	0,37
BD	1,54	1,82	1,60	-1,52	-0,67	-0,65
ABD	0,18	0,06	0,18	-0,18	0,98	1,09
CD	-0,27	-0,17	-0,31	0,10	-0,33	-0,23
ACD	0,18	0,06	0,18	-0,18	0,76	0,71
BCD	0,44	0,56	0,47	-0,28	-0,37	-0,45
ABCD	0,18	0,06	0,18	-0,18	0,64	0,73

Sala ANF PG 06 – Engenharia Mecânica

MPM - PG 06

	EDT	T30	Ts	D50	U50	STI
A	-0,02	-0,01	-0,03	0,04	-0,38	-0,37
B	-0,28	-0,35	-0,32	0,38	0,14	0,11
AB	-0,08	0,00	-0,03	0,04	-0,09	-0,13
C	0,13	0,24	0,13	-0,13	-0,10	-0,07
AC	-0,03	0,01	-0,01	0,02	0,01	0,03
BC	-0,08	-0,14	-0,09	0,04	-0,01	0,00
ABC	-0,03	0,01	-0,04	0,03	0,00	-0,06
D	-0,17	-0,17	-0,16	0,18	0,07	0,02
AD	-0,07	0,00	-0,03	0,02	-0,06	-0,09
BD	0,05	0,09	0,06	-0,03	-0,04	-0,10
ABD	-0,05	-0,03	-0,09	0,05	0,00	-0,03
CD	-0,09	-0,10	-0,12	-0,01	0,00	0,03
ACD	-0,04	-0,07	0,00	0,01	0,06	-0,01
BCD	-0,02	0,09	0,02	0,03	0,00	-0,01
ABCD	-0,04	-0,03	-0,01	-0,03	-0,05	-0,04

DOE - PG 06

	EDT	T30	Ts	D50	U50	STI
A	0,01	0,00	0,00	0,00	-1,62	-1,69
B	-1,47	-1,37	-1,49	1,59	0,61	0,47
AB	-0,01	0,00	0,00	0,00	-0,53	-0,49
C	0,81	0,92	0,77	-0,73	-0,36	-0,31
AC	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,25	0,23
BC	-0,35	-0,48	-0,37	0,23	0,09	0,11
ABC	0,01	0,00	0,00	0,00	0,04	-0,02
D	-0,71	-0,64	-0,70	0,66	0,38	0,32
AD	-0,01	0,00	0,00	0,00	-0,25	-0,28
BD	0,53	0,54	0,52	-0,46	-0,27	-0,26
ABD	0,01	0,00	0,00	0,00	0,05	0,11
CD	-0,14	-0,22	-0,16	0,04	0,03	0,06
ACD	0,01	0,00	0,00	0,00	0,04	0,01
BCD	0,14	0,20	0,15	-0,01	-0,03	-0,06
ABCD	-0,01	0,00	0,00	0,00	-0,02	-0,01

MPMz - PG 06

	EDT	T30	Ts	D50	U50	STI
A	0,38	0,16	0,17	-0,02	-3,04	-2,99
B	-2,48	-2,40	-2,63	2,99	1,48	1,47
AB	-0,28	0,23	0,17	-0,02	-0,52	-0,76
C	2,03	2,03	1,72	-1,53	-0,61	-0,20
AC	0,27	0,31	0,37	-0,20	0,35	0,72
BC	-0,28	-0,82	-0,41	-0,02	0,17	0,45
ABC	0,27	0,31	0,08	-0,11	0,26	-0,11
D	-1,27	-1,05	-1,08	1,22	0,87	0,63
AD	-0,17	0,23	0,17	-0,20	-0,26	-0,39
BD	1,15	0,91	1,05	-0,64	-0,09	-0,48
ABD	0,05	0,01	-0,41	0,06	0,26	0,17
CD	-0,39	-0,52	-0,70	-0,47	0,26	0,72
ACD	0,16	-0,30	0,46	-0,29	0,78	0,35
BCD	0,38	0,91	0,66	-0,11	0,26	0,35
ABCD	0,16	0,01	0,37	-0,64	-0,17	0,07

DOEz - PG 06

	EDT	T30	Ts	D50	U50	STI
A	0,17	0,14	0,17	-0,17	-2,99	-3,13
B	-2,72	-2,54	-2,75	2,94	1,41	1,18
AB	0,14	0,14	0,17	-0,17	-0,84	-0,74
C	1,74	1,93	1,68	-1,60	-0,50	-0,38
AC	0,14	0,14	0,17	-0,17	0,70	0,70
BC	-0,53	-0,80	-0,56	0,28	0,39	0,46
ABC	0,17	0,14	0,17	-0,17	0,29	0,20
D	-1,23	-1,11	-1,20	1,12	0,96	0,88
AD	0,14	0,14	0,17	-0,17	-0,28	-0,32
BD	1,19	1,19	1,19	-1,07	-0,32	-0,28
ABD	0,17	0,14	0,17	-0,17	0,31	0,46
CD	-0,12	-0,29	-0,15	-0,09	0,27	0,36
ACD	0,17	0,14	0,17	-0,17	0,29	0,26
BCD	0,43	0,53	0,46	-0,19	0,15	0,12
ABCD	0,14	0,14	0,17	-0,17	0,17	0,22

Sala ANF 04 – Biológicas

MPM - ANF 04

	EDT	T30	Ts	D50	U50	STI
A	-0,06	-0,03	-0,06	0,03	-0,32	-0,29
B	-0,43	-0,34	-0,40	0,42	0,23	0,08
AB	-0,04	-0,01	-0,02	0,03	-0,20	-0,20
C	0,02	0,06	-0,01	0,00	-0,08	-0,07
AC	-0,03	-0,03	-0,01	-0,01	-0,08	-0,05
BC	-0,05	-0,08	-0,09	0,07	-0,09	-0,06
ABC	0,01	-0,05	-0,02	0,02	-0,04	-0,02
D	-0,22	-0,25	-0,24	0,22	0,05	0,04
AD	-0,01	-0,02	0,02	-0,02	-0,10	-0,15
BD	0,14	0,15	0,14	-0,07	-0,14	-0,15
ABD	-0,04	-0,01	0,01	0,04	-0,04	-0,04
CD	-0,01	-0,04	-0,04	0,03	-0,02	-0,05
ACD	-0,04	0,02	-0,03	0,03	-0,08	-0,09
BCD	-0,01	0,00	-0,04	0,04	-0,01	-0,02
ABCD	-0,03	0,01	0,00	0,03	-0,06	-0,07

DOE - ANF 04

	EDT	T30	Ts	D50	U50	STI
A	0,00	0,00	0,00	0,00	-1,21	-1,36
B	-1,60	-1,43	-1,59	1,74	1,01	0,79
AB	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,69	-0,69
C	0,12	0,09	0,11	-0,06	-0,19	-0,19
AC	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,09	-0,10
BC	-0,10	-0,19	-0,10	0,04	-0,08	-0,09
ABC	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,12	-0,14
D	-0,83	-0,91	-0,84	0,72	0,49	0,41
AD	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,35	-0,38
BD	0,69	0,90	0,70	-0,46	-0,53	-0,58
ABD	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,12	-0,07
CD	-0,06	-0,10	-0,06	0,02	-0,11	-0,12
ACD	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,11	-0,12
BCD	0,06	0,05	0,06	-0,02	-0,13	-0,15
ABCD	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,12	-0,12

MPMz - ANF 04

	EDT	T30	Ts	D50	U50	STI
A	-0,05	0,10	-0,06	-0,23	-2,14	-2,32
B	-2,98	-2,55	-2,82	3,08	2,48	1,69
AB	0,11	0,27	0,26	-0,23	-1,13	-1,34
C	0,58	0,87	0,35	-0,49	-0,12	0,06
AC	0,18	0,10	0,35	-0,57	-0,12	0,28
BC	0,03	-0,33	-0,30	0,11	-0,21	0,17
ABC	0,50	-0,07	0,26	-0,32	0,21	0,61
D	-1,32	-1,78	-1,52	1,38	0,97	1,26
AD	0,34	0,18	0,59	-0,66	-0,29	-0,80
BD	1,53	1,63	1,56	-1,08	-0,63	-0,80
ABD	0,11	0,27	0,51	-0,15	0,21	0,39
CD	0,34	0,01	0,10	-0,23	0,38	0,28
ACD	0,11	0,52	0,18	-0,23	-0,12	-0,15
BCD	0,34	0,35	0,10	-0,15	0,47	0,61
ABCD	0,18	0,44	0,43	-0,23	0,04	0,06

DOEz - ANF 04

	EDT	T30	Ts	D50	U50	STI
A	0,23	0,21	0,23	-0,26	-2,15	-2,45
B	-2,95	-2,62	-2,93	3,21	2,38	2,07
AB	0,23	0,21	0,23	-0,26	-1,09	-1,04
C	0,47	0,39	0,45	-0,38	-0,07	0,01
AC	0,23	0,21	0,23	-0,26	0,14	0,20
BC	0,03	-0,17	0,03	-0,18	0,16	0,22
ABC	0,23	0,21	0,23	-0,26	0,07	0,11
D	-1,42	-1,59	-1,44	1,18	1,32	1,27
AD	0,23	0,21	0,23	-0,26	-0,39	-0,39
BD	1,60	1,99	1,62	-1,18	-0,76	-0,81
ABD	0,23	0,21	0,23	-0,26	0,07	0,26
CD	0,11	0,01	0,11	-0,22	0,10	0,16
ACD	0,23	0,21	0,23	-0,26	0,10	0,16
BCD	0,35	0,31	0,35	-0,30	0,05	0,09
ABCD	0,23	0,21	0,23	-0,26	0,07	0,16

Sala ANF 02 – Biológicas

MPM - ANF 02

	EDT	T30	Ts	D50	U50	STI
A	-0,03	-0,01	-0,05	0,02	-0,42	-0,44
B	-0,40	-0,37	-0,44	0,43	0,14	0,09
AB	0,02	-0,05	-0,03	0,00	-0,18	-0,12
C	0,10	0,13	0,13	-0,08	-0,10	-0,07
AC	-0,02	-0,03	-0,06	0,06	0,03	-0,06
BC	-0,13	-0,10	-0,09	0,01	-0,04	0,01
ABC	-0,07	0,03	-0,04	0,01	0,03	-0,06
D	-0,11	-0,11	-0,13	0,12	0,01	0,00
AD	-0,01	0,05	-0,03	0,01	-0,02	-0,03
BD	0,05	0,03	0,06	-0,02	-0,04	-0,07
ABD	0,00	-0,04	-0,06	0,05	0,01	-0,04
CD	-0,08	-0,06	-0,03	0,08	-0,01	-0,04
ACD	0,00	-0,03	-0,05	-0,03	-0,01	0,00
BCD	0,00	-0,01	-0,03	0,01	-0,05	-0,04
ABCD	-0,06	-0,05	-0,04	0,04	-0,03	-0,03

DOE - ANF 02

	EDT	T30	Ts	D50	U50	STI
A	0,00	0,00	0,00	0,00	-1,70	-1,77
B	-1,68	-1,70	-1,71	1,81	0,66	0,49
AB	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,55	-0,51
C	0,68	0,64	0,63	-0,53	-0,26	-0,26
AC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,12	0,13
BC	-0,41	-0,47	-0,39	0,21	0,08	0,09
ABC	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,01	-0,03
D	-0,42	-0,39	-0,44	0,37	0,11	0,07
AD	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,12	-0,09
BD	0,29	0,26	0,28	-0,17	-0,08	-0,06
ABD	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02
CD	-0,09	-0,13	-0,09	0,00	0,01	0,00
ACD	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
BCD	0,09	0,09	0,08	-0,01	-0,01	-0,01
ABCD	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

MPMz - ANF 02

	EDT	T30	Ts	D50	U50	STI
A	0,17	0,29	0,08	-0,24	-3,01	-3,30
B	-3,08	-3,01	-3,14	3,30	1,49	1,30
AB	0,61	-0,08	0,24	-0,41	-1,08	-0,52
C	1,31	1,57	1,56	-1,10	-0,44	-0,09
AC	0,26	0,10	-0,01	0,11	0,61	0,00
BC	-0,71	-0,54	-0,25	-0,32	0,04	0,61
ABC	-0,18	0,65	0,16	-0,32	0,61	0,00
D	-0,53	-0,63	-0,58	0,63	0,44	0,52
AD	0,35	0,84	0,24	-0,32	0,20	0,26
BD	0,87	0,65	0,99	-0,58	0,04	-0,09
ABD	0,43	0,01	-0,01	0,02	0,44	0,17
CD	-0,27	-0,17	0,24	0,28	0,28	0,17
ACD	0,43	0,10	0,08	-0,67	0,28	0,52
BCD	0,43	0,29	0,24	-0,32	-0,04	0,17
ABCD	-0,09	-0,08	0,16	-0,06	0,12	0,26

DOEz - ANF 02

	EDT	T30	Ts	D50	U50	STI
A	0,20	0,22	0,22	-0,22	-3,15	-3,28
B	-3,12	-3,14	-3,17	3,36	1,54	1,24
AB	0,20	0,22	0,22	-0,22	-0,86	-0,76
C	1,55	1,49	1,46	-1,27	-0,29	-0,26
AC	0,20	0,22	0,22	-0,22	0,47	0,52
BC	-0,61	-0,71	-0,56	0,19	0,39	0,44
ABC	0,20	0,22	0,22	-0,22	0,21	0,20
D	-0,63	-0,55	-0,65	0,51	0,45	0,40
AD	0,20	0,22	0,22	-0,22	-0,01	0,08
BD	0,78	0,74	0,77	-0,56	0,07	0,14
ABD	0,20	0,22	0,22	-0,22	0,25	0,30
CD	0,03	-0,03	0,04	-0,22	0,25	0,26
ACD	0,20	0,22	0,22	-0,22	0,25	0,26
BCD	0,38	0,40	0,37	-0,24	0,21	0,24
ABCD	0,20	0,22	0,22	-0,22	0,23	0,26